

TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

Drevárska fakulta

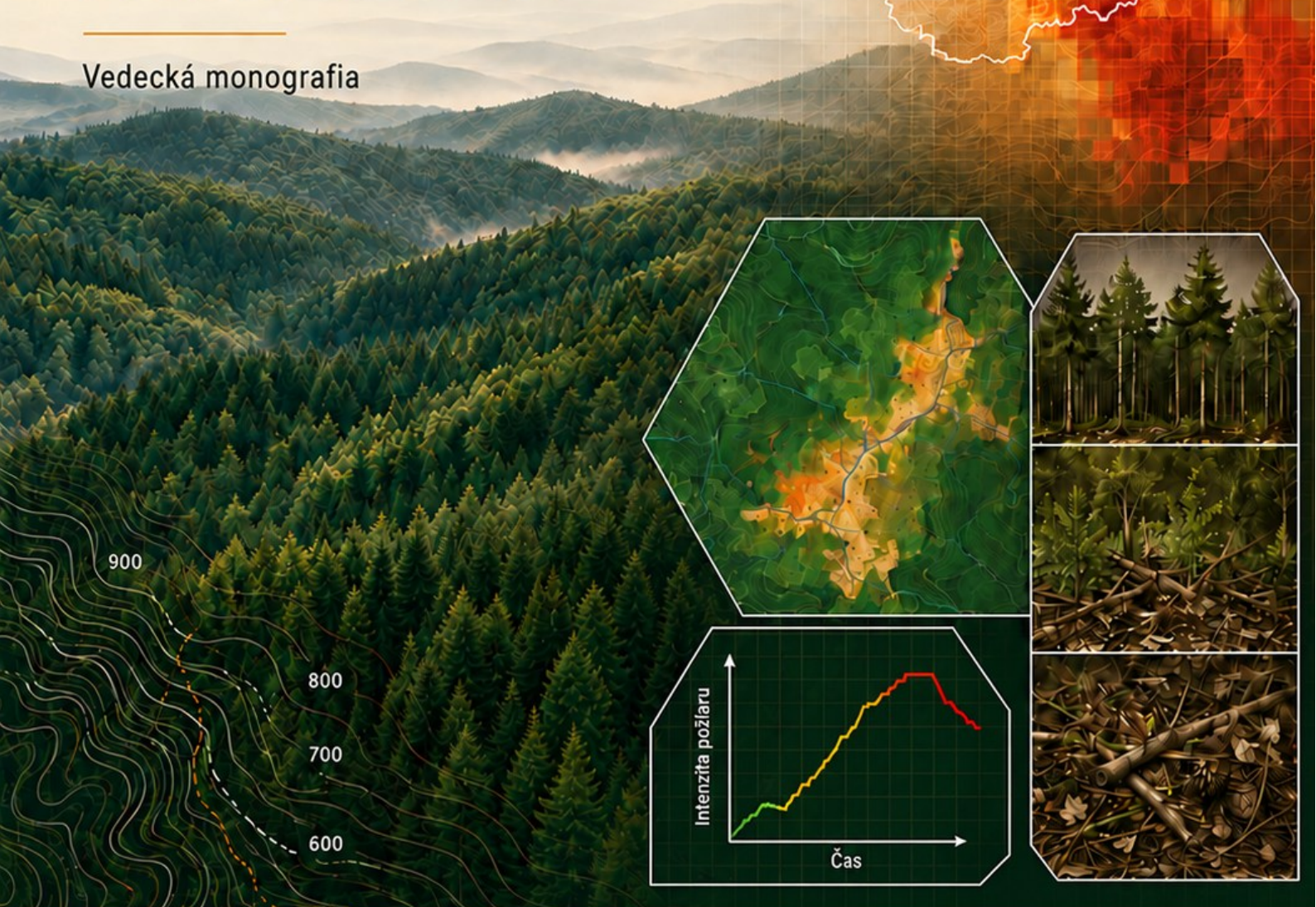
Andrea MAJLINGOVÁ

Maroš SEDLIAK

Martin LIESKOVSKÝ

LESNÉ PALIVO SLOVENSKA: MAPOVANIE, PALIVOVÉ MODELY A VYUŽITIE VÝSLEDKOV PRI HODNOTENÍ POŽIARNEHO RIZIKA

Vedecká monografia



Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I01-03-V04-00009.

Autori:

prof. Mgr. Ing. Andrea Majlingová, PhD., MSc.	Technická univerzita vo Zvolene
Ing. Maroš Sedliak, PhD.	Národné lesnícke centrum
doc. Ing. Martin Lieskovský, PhD.	Technická univerzita vo Zvolene

LESNÉ PALIVO SLOVENSKA: MAPOVANIE, PALIVOVÉ MODELY A VYUŽITIE VÝSLEDKOV PRI HODNOTENÍ POŽIARNEHO RIZIKA

Vedecká monografia

Recenzenti:

prof. Ing. Ján Tuček, CSc.	Technická univerzita vo Zvolene
doc. Ing. Tomáš Mikita, Ph.D.	Mendlova univerzita v Brně

I. – 2026, 265 s.

Forma dokumentu: elektronická (online PDF)

Vydavateľstvo: Technická univerzita vo Zvolene

Design: prof. Mgr. Ing. Andrea Majlingová, PhD., MSc.

© Technická univerzita vo Zvolene
© prof. Mgr. Ing. Andrea Majlingová, PhD., MSc.
© Ing. Maroš Sedliak, PhD.
© doc. Ing. Martin Lieskovský, PhD.

Rukopis neprešiel jazykovou korektúrou. Za odbornú a jazykovú úroveň tejto publikácie zodpovedajú autori a recenzenti.

ISBN 978-80-228-3543-5

Všetky práva vyhradené. Nijaká časť textu ani ilustrácie nemôžu byť použité na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo vydavateľstva.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

Drevárska fakulta

Andrea MAJLINGOVÁ

Maroš SEDLIAK

Martin LIESKOVSKÝ

**LESNÉ PALIVO SLOVENSKA: MAPOVANIE, PALIVOVÉ
MODELY A VYUŽITIE VÝSLEDKOV PRI HODNOTENÍ
POŽIARNEHO RIZIKA**

PREDSLOV

Lesné požiare sú prirodzeným javom v mnohých typoch krajiny, v podmienkach Slovenska však vznikajú prevažne v dôsledku ľudskej činnosti. Ich priebeh a následky závisia od súbehu viacerých okolností. Rozhodujú meteorologické podmienky, reliéf, stav a štruktúra vegetácie, množstvo dostupného paliva, jeho vlhkosť, spôsob využívania územia aj možnosti včasného zistenia a zásahu. Z týchto faktorov má osobitné postavenie lesné palivo. Bez jeho prítomnosti sa požiar nemôže rozvinúť a bez poznania jeho vlastností nemožno spoľahlivo posúdiť, ako sa bude požiar v poraste správať.

Pod pojmom lesné palivo sa rozumie živá a odumretá organická hmota schopná zapálenia a horenia. V lesnom prostredí ju tvorí opad, hrabanka, bylinná vegetácia, kry, prirodzené zmladenie, konáre, ležiace drevo, pne, suché časti stromov aj korunová biomasa. Jednotlivé zložky sa odlišujú pôvodom, rozmermi, hustotou uloženia, obsahom vody, stupňom rozkladu a polohou v poraste. Práve tieto rozdiely ovplyvňujú ich zapáliteľnosť, rýchlosť horenia, množstvo uvoľneného tepla a schopnosť šírenia sa požiaru do ďalších vrstiev vegetácie.

Pri hodnotení požiarneho prostredia preto nestačí poznať iba celkové množstvo paliva. Dôležité je aj jeho rozdelenie podľa veľkostných frakcií, podiel živého a odumretého materiálu, horizontálna spojitosť a vertikálne prepojenie jednotlivých vrstiev. Jemné odumreté palivo reaguje na zmeny počasia rýchlejšie než hrubé drevné časti. Po krátkom období sucha môže vytvárať podmienky na ľahké zapálenie a rýchle šírenie povrchového požiaru. Hrubšie palivo sa zapáľuje pomalšie, horí však dlhšie a zvyšuje tepelnú záťaž požiariska. Kroviny, spodné vetvy a prirodzené zmladenie môžu vytvárať spojenie medzi povrchovým a korunovým palivom. Ak je toto spojenie dostatočne súvislé, povrchový požiar môže prejsť do korún stromov.

Lesné palivo sa navyše v čase mení. Jeho množstvo a usporiadanie ovplyvňuje vek a vývoj porastu, drevinové zloženie, hospodárske zásahy, kalamity, zdravotný stav lesa, sukcesia aj rozklad odumretej biomasy. Krátkodobú zmenu jeho požiarnych vlastností spôsobuje najmä počasie. Teplota vzduchu, relatívna vlhkosť, zrážky, vietor a slnečné žiarenie určujú, ako rýchlo palivo presychá a či je v danom čase schopné zapálenia. Rovnaký porast preto môže v rôznych obdobiach predstavovať výrazne odlišné požiarne nebezpečenstvo.

Význam tejto premenlivosti rastie v súvislosti so zmenou klimatických podmienok. Dlhšie obdobia bez zrážok, vyššie teploty a častejšie epizódy sucha podporujú vysušovanie jemného paliva a predlžujú obdobie, počas ktorého je vegetácia dostupná pre horenie. Zároveň sa zvyšuje výskyt porastov oslabených suchom, vetrom alebo biotickými škodcami. V takýchto porastoch môže narastať množstvo odumretej biomasy a meniť sa jej priestorové rozloženie. Nejde teda iba o zmenu počasia počas požiaru, ale aj o postupnú zmenu samotného palivového prostredia.

Na Slovensku existujú rozsiahle databázy opisujúce lesné porasty, ich drevinové zloženie, vek, zakmenenie, hospodársky tvar a stanovištné podmienky. Tieto údaje však boli vytvorené najmä pre potreby lesného hospodárstva. Lesnícka charakteristika porastu preto ešte nie je palivovým modelom a nemožno ju bez ďalšieho spracovania priamo použiť na hodnotenie správania požiaru. Porasty s rovnakou hlavnou drevinou a podobným vekom sa môžu výrazne líšiť množstvom hrabanky, zastúpením bylín a krov, výskytom ležiaceho dreva, výškou korunovej bázy aj vertikálnou spojitou paliva.

Údaje o lesnom palive je preto potrebné získavať a vyhodnocovať viacerými spôsobmi. Terénne merania poskytujú podrobné informácie o množstve a štruktúre paliva na konkrétnych plochách. Laboratórne skúšky umožňujú stanoviť jeho požiarne vlastnosti. Údaje diaľkového prieskumu Zeme pomáhajú zachytiť priestorovú štruktúru vegetácie a zmeny porastov na väčšom území. Lesnícke a environmentálne databázy dopĺňajú údaje o drevinách, veku, stanovišti a hospodárskom stave. Geografické informačné systémy umožňujú tieto podklady prepájať, porovnávať a spracúvať do priestorovo súvislých vrstiev.

Prekážkou zostáva rozdielny pôvod, mierka, presnosť a časová platnosť vstupných údajov. Terénne meranie je presné, ale vzťahuje sa na obmedzený počet lokalít. Databázové údaje pokrývajú rozsiahle územia, no palivové charakteristiky vyjadrujú prevažne nepriamo. Družicové a letecké údaje poskytujú informácie o priestorovej štruktúre vegetácie, ale musia byť kalibrované pomocou pozemných meraní. Laboratórne výsledky opisujú požiarne vlastnosti konkrétneho materiálu, bez priestorového priradenia však nehovoria, kde a v akom množstve sa tento materiál vyskytuje.

Predkladaná monografia sa preto nezameriava iba na výsledné mapovanie lesného paliva. Jej jadrom je súbor pôvodných metodických postupov, ktoré na seba obsahovo nadväzujú. Zahŕňajú získavanie terénnych údajov, hodnotenie požiarnych vlastností paliva, klasifikáciu palivových zložiek, tvorbu geodatabázy, priestorové odvodenie vybraných charakteristík, návrh palivových modelov a využitie získaných údajov pri hodnotení nebezpečenstva a rizika vzniku požiaru.

Hlavným cieľom monografie je vytvoriť ucelený metodický rámec na zisťovanie, klasifikáciu a priestorové hodnotenie lesného paliva v podmienkach Slovenskej republiky. Súčasťou cieľa je aj prepojenie údajov o palive s hodnotením podmienok vzniku a možného šírenia požiaru. Navrhované postupy majú umožniť, aby boli údaje získané z rozdielnych zdrojov spracované jednotným, kontrolovateľným a opakovateľným spôsobom.

Na splnenie hlavného cieľa bolo potrebné riešiť niekoľko vzájomne prepojených úloh. Prvou bolo jednotné vymedzenie palivových zložiek a parametrov, ktoré sú významné z hľadiska vzniku a rozvoja požiaru. Ďalšou bolo vytvorenie terénnych a laboratórnych postupov na ich zisťovanie a hodnotenie. Pozornosť sa venovala aj transformácii dostupných lesníckych a diaľkovo snímaných údajov na charakteristiky využiteľné pri mapovaní paliva. Samostatnú časť tvorí návrh palivových modelov zodpovedajúcich podmienkam slovenských lesov a postupy využitia získaných údajov pri hodnotení náchylnosti, aktuálneho požiarneho nebezpečenstva, zraniteľnosti a požiarneho rizika.

Pôvodný vedecký prínos monografie nespočíva v použití jednotlivých známych nástrojov, akými sú geografické informačné systémy, terénne meranie, laboratórne skúšky alebo diaľkový prieskum Zeme. Spočíva v spôsobe ich prepojenia, v nových klasifikačných pravidlách, v návrhu údajových väzieb a v postupoch, ktorými sa rozdielne vstupy transformujú na vzájomne porovnateľné charakteristiky lesného paliva. Pôvodné metodiky sú rozpracované vo väčšine kapitol a tvoria jeden nadväzujúci systém, nie súbor samostatných návodov.

Pri spracovaní sa dôsledne rozlišujú údaje získané priamym meraním, údaje prevzaté z existujúcich databáz, údaje odvodené výpočtom a hodnoty stanovené na základe navrhnutých metodických pravidiel. Toto členenie je potrebné na správne posúdenie presnosti, neistoty a použiteľnosti výsledkov. Osobitná pozornosť sa venuje aj rozdielu medzi priestorovým rozlíšením výstupnej vrstvy a skutočnou informačnou podrobnosťou vstupných údajov. Prevzorkovanie údajov na jemnejšiu rastrovú mriežku samo osebe nezvyšuje ich obsahovú presnosť.

Monografia nekladie dôraz na prezentovanie rozsiahleho súboru výsledných máp. Takéto výstupy sú vždy viazané na konkrétne obdobie, stav databáz a zvolenú priestorovú jednotku. Dôraz sa preto kladie na podrobný opis metodických postupov, klasifikačných pravidiel, výpočtových vzťahov a podmienok použitia. Výsledné mapové vrstvy možno na základe týchto postupov vytvárať opakovane a aktualizovať ich podľa dostupnosti nových údajov.

Jednotlivé kapitoly postupne prechádzajú od vymedzenia lesného paliva a jeho požiarnych vlastností k spôsobom jeho zisťovania, klasifikácie a priestorového spracovania. Nadväzujú na ne metodiky tvorby palivových modelov a využitia údajov o palive pri hodnotení nebezpečenstva a rizika vzniku požiaru. Takéto členenie zodpovedá logike práce s údajmi: od identifikácie paliva cez jeho meranie a hodnotenie až po praktické využitie výsledkov.

Monografia je určená vedeckým a odborným pracovníkom v oblasti protipožiarnej ochrany, lesníctva, geoinformatiky, diaľkového prieskumu Zeme, krízového riadenia a ochrany prírody. Využiteľná môže byť pri výskume lesných požiarov, príprave preventívnych opatrení, manažmente paliva, manažmente lesných porastov a chránených území, plánovaní zásahu a hodnotení území, v ktorých sa lesné porasty stretávajú so sídlami, dopravnou a technickou infraštruktúrou alebo inými chránenými hodnotami.

Navrhnuté postupy nie sú chápané ako nemenný systém. Stav lesných porastov, kvalita dostupných údajov aj technické možnosti ich získavania a spracovania sa menia. Metodiky sú preto koncipované tak, aby ich bolo možné overovať, dopĺňať a aktualizovať. Ich úlohou je vytvoriť spoločný odborný základ, ktorý umožní získavať a interpretovať údaje o lesnom palive porovnateľným spôsobom a využívať ich pri hodnotení lesných požiarov ako aj požiarov v prírodnom prostredí vôbec.

OBSAH

1. LESNÉ PALIVO AKO URČUJÚCI FAKTOR SPRÁVANIA POŽIARU V PRÍRODNOM PROSTREDÍ	8
1.1. Požiar v prírodnom prostredí a jeho základné charakteristiky	8
1.2. Lesné palivo ako súčasť požiarneho prostredia	14
1.3. Štruktúra lesného paliva a jeho priestorové usporiadanie	18
1.4. Povrchové, podzemné a korunové palivo	22
1.5. Živé a odumreté palivo v lesnom prostredí	28
1.6. Horizontálna a vertikálna kontinuita paliva	33
1.7. Množstvo paliva a jeho význam pre intenzitu požiaru	39
1.8. Vlhkosť paliva a jej vplyv na zapáliteľnosť a šírenie požiaru	40
1.9. Prechod povrchového požiaru do korunového požiaru	47
1.10. Význam poznania paliva pre hodnotenie požiarneho rizika	52
2. METODICKÝ RÁMEC MAPOVANIA PALIVA V LESOCH SLOVENSKEJ REPUBLIKY	57
2.1. Východiská mapovania lesného paliva	59
2.2. Priestorový rozsah a tematické zameranie mapovania	63
2.3. Vstupné údaje využiteľné pri mapovaní paliva	69
2.4. Lesnícke, topografické, environmentálne údaje a údaje diaľkového prieskumu Zeme	76
2.5. Princípy klasifikácie paliva v lesnom prostredí	85
2.6. Výber hodnotených parametrov povrchového, rebríkového a korunového paliva	94
2.7. Prepojenie terénneho zisťovania a geopriestorového spracovania údajov	113
2.8. Spracovanie údajov v prostredí geografických informačných systémov	120
2.9. Tvorba rastrových a vektorových vrstiev	129
2.10. Overenie, kontrola a interpretácia mapových výstupov	140
2.11. Limity a neistoty pri mapovaní lesného paliva	151
3. TERÉNNÉ ZISŤOVANIE A KVANTIFIKÁCIA POVRCHOVÉHO, REBRÍKOVÉHO A KORUNOVÉHO PALIVA	161
3.1. Koncepcia palivového profilu priestorovej jednotky	161
3.2. Priestorový dizajn terénneho zisťovania	163
3.3. Výber lokalít pre podmienky Slovenska	163
3.4. Zisťovanie povrchového paliva	164
3.5. Horizontálna spojitosť a dominantný nositeľ šírenia	165
3.6. Kvantifikácia množstva povrchového paliva a veľkostných frakcií	165
3.7. Rebríkové palivo ako samostatná vrstva	166

3.8. Korunové palivo: merané, odvodené a modelované parametre.....	167
3.9. Vlhkosť paliva ako oddelená dynamická vrstva	169
3.10. Dátový tok, kontrola kvality a sledovateľnosť.....	169
3.11. Prechod od terénneho merania k palivovej mape	170
4. TVORBA GEODATABÁZY LESNÉHO PALIVA SLOVENSKA	172
4.1. Úloha geodatabázy pri spracovaní údajov o palive.....	172
4.2. Návrh štruktúry geodatabázy	173
4.3. Grafické a numerické údaje v geodatabáze.....	174
4.4. Atribútová štruktúra databázových vrstiev	174
4.5. Rastrové vrstvy priestorovej distribúcie paliva	175
4.6. Vektorové vrstvy a ich tematické využitie.....	176
4.7. Väzba medzi terénnymi údajmi, atribútmi a priestorovými vrstvami.....	177
4.8. Formáty údajov, metadáta a dokumentácia výstupov	177
4.9. Kontrola kvality údajov a identifikácia neúplností	178
4.10. Vizualizácia geodatabázových výstupov	179
4.11. Možnosti aktualizácie a ďalšieho rozvoja geodatabázy	179
5. PRIESTOROVÉ ODVODENIE A HODNOTENIE POVRCHOVÉHO PALIVA V LESOCH SLOVENSKEJ REPUBLIKY	181
5.1. Východiská priestorového hodnotenia povrchového paliva	181
5.2. Palivový profil povrchovej vrstvy ako základ priestorového odvodu	182
5.3. Priestorové odvodenie množstva povrchového paliva	183
5.4. Priestorové odvodenie jednotlivých zložiek povrchového paliva	184
5.5. Opad, hrabanka a ležiace drevo v priestorovom hodnotení.....	185
5.6. Vzťah porastovej štruktúry a povrchového paliva	186
5.7. Priestorová variabilita a heterogenita povrchového paliva	186
5.8. Hodnotenie potenciálu povrchového šírenia požiaru	187
5.9. Tvorba, agregácia a aktualizácia mapových výstupov povrchového paliva	188
5.10. Interpretácia, neistota a obmedzenia použitia.....	189
6. PRIESTOROVÉ ODVODENIE A HODNOTENIE REBRÍKOVÉHO A KORUNOVÉHO PALIVA V LESOCH SLOVENSKEJ REPUBLIKY	191
6.1. Východiská hodnotenia vertikálneho palivového profilu	191
6.2. Rebríkové palivo a vertikálna kontinuita.....	192
6.3. Základné parametre korunového paliva.....	193
6.4. Výška korunovej bázy a hĺbka koruny.....	193

6.5. Plošné množstvo a objemová hustota korunového paliva	194
6.6. Priestorové odvodenie rebríkového a korunového paliva	194
6.7. Prepojenie povrchového, rebríkového a korunového paliva	195
6.8. Hodnotenie potenciálu prechodu požiaru do korunovej vrstvy	196
6.9. Tvorba, agregácia a aktualizácia mapových výstupov	196
6.10. Interpretácia, neistota a obmedzenia použitia.....	197
7. NÁVRH A TVORBA PALIVOVÝCH MODELOV PRE LESNÉ PROSTREDIE SLOVENSKEJ REPUBLIKY	199
7.1. Význam palivových modelov pri hodnotení správania požiaru.....	199
7.2. Referenčné prístupy ku klasifikácii palivových modelov.....	200
7.3. Východiská tvorby palivových modelov pre podmienky Slovenska.....	201
7.4. Vzťah medzi typom porastu, stanovištnými podmienkami a palivovým modelom	202
7.5. Parametre palivových modelov	202
7.6. Viacstupňové priradenie palivového modelu.....	203
7.7. Povrchové palivové modely pre lesné prostredie Slovenska	204
7.8. Prepojenie povrchového palivového modelu s rebríkovými a korunovými parametrami	205
7.9. Tvorba priestorovej vrstvy palivových modelov.....	205
7.10. Využitie a overenie palivových modelov pri modelovaní správania požiaru	206
7.11. Neistota, limity a aktualizácia palivových modelov	207
8. HODNOTENIE POŽIARNYCH VLASTNOSTÍ LESNÝCH PALÍV A ICH PREPOJENIE S MAPOVANÍM	208
8.1. Požiarne vlastnosti paliva ako doplnok priestorového hodnotenia	208
8.2. Zapáliteľnosť lesných palív	209
8.3. Vplyv vlhkosti na iniciáciu a udržanie horenia.....	210
8.4. Tepelný rozklad, pyrolýza a horenie rastlinného materiálu	211
8.5. Termická analýza lesných palív a jej interpretačný význam.....	211
8.6. Množstvo popola, spalné teplo a výhrevnosť paliva.....	212
8.7. Kritické hodnoty vlhkosti vo vzťahu k zapáliteľnosti	212
8.8. Rozdiely medzi druhmi a zložkami lesného paliva	213
8.9. Prepojenie laboratórnych údajov s palivovým profilom a palivovými modelmi	214
8.10. Využitie požiarnych vlastností pri hodnotení požiarneho nebezpečenstva a rizika	215
8.11. Experimentálny protokol, overovanie a ďalší rozvoj databázy požiarnych vlastností	216
9. VYUŽITIE VÝSLEDKOV PRI HODNOTENÍ RIZIKA VZNIKU POŽIARU V LESNOM PROSTREDÍ	218
9.1. Požiarne riziko v lesnom prostredí a jeho zložky	218

9.2. Náchylnosť lesného prostredia na vznik požiaru.....	219
9.5. Reziliencia lesných ekosystémov po požiarí	223
9.6. Vstupné faktory, harmonizácia a normalizácia.....	223
9.7. Využitie údajov o palive pri hodnotení šírenia požiaru	224
9.8. Integrácia čiastkových zložiek do komplexného hodnotenia	225
9.9. GIS spracovanie a tvorba mapových vrstiev.....	226
9.10. Interpretácia výsledkov a návrh preventívnych opatrení	227
9.11. Využitie výsledkov v lesnom hospodárstve, protipožiarnej ochrane a krízovom riadení	228
9.12. Validácia, neistota, citlivostná analýza a podmienky opakovateľnosti.....	228
10. POZNATKOVÁ BÁZA O PALIVE V LESE A OTVORENÝ PRÍSTUP K VÝSLEDKOM	231
10.1. Význam otvoreného prístupu k údajom o lesnom palive	231
10.2. Štruktúra poznatkovej bázy o palive a požiarom riziku	232
10.3. Typy údajov zahrnuté v poznatkovej báze	232
10.4. Geodatabáza, mapové vrstvy a tabuľkové databázy	233
10.5. Metadáta, dokumentácia a používateľská interpretácia výstupov	234
10.6. Cieľové skupiny používateľov poznatkovej bázy.....	236
10.7. Využitie poznatkovej bázy vo výskume a vzdelávaní	236
10.8. Využitie poznatkovej bázy v lesníckej praxi a v praxi ochrany pred požiarom	236
10.9. Princípy aktualizácie a dlhodobej udržateľnosti poznatkovej bázy	237
10.10. Obmedzenia otvoreného sprístupnenia a ochrana citlivých údajov	238
11. APLIKAČNÝ VÝZNAM VÝSLEDKOV PRE PROTIPOŽIARNU OCHRANU, LESNÉ HOSPODÁRSTVO A KRÍZOVÉ RIADENIE	240
11.1. Využitie mapovania paliva pri prevencii lesných požiarov	240
11.2. Podpora rozhodovania v protipožiarnej ochrane	241
11.9. Prepojenie výsledkov s klimatickou adaptáciou a manažmentom krajiny	247
11.10. Praktické odporúčania pre ďalšie využívanie výstupov	247
ZÁVER	250
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	254
ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV	261
REGISTER POJMOV	264

1. LESNÉ PALIVO AKO URČUJÚCI FAKTOR SPRÁVANIA POŽIARU V PRÍRODNOM PROSTREDÍ

Lesné palivo je základnou materiálnou podmienkou vzniku a ďalšieho šírenia požiaru v lesnom prostredí. Bez prítomnosti horľavého materiálu nemôže dôjsť k iniciácii horenia ani k jeho prenosu na ďalšie časti vegetácie. Samotná prítomnosť paliva však ešte neznamená, že požiar vznikne. Nebezpečenstvo vzniku požiaru závisí od požiarnych vlastností paliva, jeho aktuálnej vlhkosti, množstva a priestorového usporiadania, od meteorologických podmienok a od prítomnosti zdroja iniciácie. Po vzniku požiaru ovplyvňujú vlastnosti palivového komplexu najmä rýchlosť jeho šírenia, intenzitu horenia, dĺžku plameňa a možnosť prechodu z povrchovej vrstvy do korún stromov (Rothermel, 1972; Pyne et al., 1996; Scott a Burgan, 2005; Keane, 2015).

V lesnom prostredí sa palivo nevyskytuje ako jednotná a rovnomerne rozložená vrstva. Tvoria ho živé a odumreté časti vegetácie, ktoré sa odlišujú pôvodom, rozmermi, tvarom, obsahom vody, stupňom rozkladu, hustotou uloženia a polohou v poraste. Palivový komplex zahŕňa opad, hrabanku, bylinnú vegetáciu, kry, prirodzené zmladenie, jemné a hrubé drevné časti, ležiace drevo, pne, spodné vetvy a biomasu korún stromov. Rozdiely medzi týmito zložkami určujú ich zapáliteľnosť, rýchlosť tepelného rozkladu, spôsob horenia a schopnosť prenášať požiar do ďalších častí porastu (Brown a Smith, 2000; Sandberg et al., 2001; Keane, 2015).

Pri posudzovaní nebezpečenstva vzniku požiaru má osobitný význam jemné odumreté palivo. Vzhľadom na veľký povrch v pomere k objemu rýchlo reaguje na zmeny teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, rýchlo presychá a na jeho zapálenie je potrebné menšie množstvo energie než pri hrubších palivových časticiach. Suché ihličie, lístie, stebľa tráv, drobné vetvičky a odumreté časti bylín preto často vytvárajú vrstvu, v ktorej sa požiar iniciuje a následne šíri po povrchu pôdy (Fosberg, 1970; Nelson, 2001; Matthews, 2014).

Hrubšie drevné palivo reaguje na zmeny prostredia pomalšie. Jeho vlhkosť sa nemení tak rýchlo ako vlhkosť jemných palivových častíc a na zapálenie potrebuje dlhšie tepelné pôsobenie. Po zapálení však môže horieť alebo žeravieť dlhý čas, zvyšovať celkové množstvo uvoľneného tepla a komplikovať dohášanie požiariska. Ležiace kmene, hrubé konáre, pne a koreňové systémy môžu zostať aktívne aj po prechode hlavného čela požiaru a vytvárať podmienky na jeho opätovné rozhorenie (Brown et al., 2003; Rein, 2013).

Riziko vzniku požiaru nemožno odvodiť iba z celkového množstva biomasy. Rozhodujúce je, aká časť biomasy je pri daných podmienkach dostupná pre zapálenie, ako sú jednotlivé palivové častice rozmiestnené a či medzi nimi existuje dostatočná horizontálna alebo vertikálna spojitosť. Súvislá vrstva jemného suchého paliva môže umožniť rýchle šírenie požiaru aj pri pomerne menšom množstve paliva. Naopak, väčšie množstvo hrubého a priestorovo oddeleného materiálu nemusí výrazne podporiť počiatočné šírenie, môže však podstatne predĺžiť dobu horenia a zvýšiť náročnosť zásahu (Rothermel, 1972; Anderson, 1982; Scott a Burgan, 2005).

1.1. Požiar v prírodnom prostredí a jeho základné charakteristiky

Požiar v prírodnom prostredí predstavuje nekontrolované horenie vegetácie a ďalšej organickej hmoty, ktoré sa šíri vo voľnej krajine. Podľa charakteru zasiahnutého územia môže ísť o požiar lesa, trávnatého

alebo krovinového porastu, poľnohospodárskej vegetácie, rúbaniska, kalamitnej plochy, rašeliniska alebo územia na rozhraní lesa a zástavby. Jednotlivé formy sa môžu počas tej istej udalosti striedať. Požiar môže vzniknúť v suchej tráve mimo lesa, pokračovať krovinovým porastom a následne zasiahnuť lesný porast. Pri hodnotení jeho priebehu preto nie je rozhodujúce iba administratívne zaradenie miesta vzniku, ale predovšetkým charakter paliva, ktorým sa požiar šíri, a podmienky, ktoré ovplyvňujú jeho horenie (Pyne et al., 1996; Scott, 2018).

Lesný požiar je osobitným typom požiaru v prírodnom prostredí, pri ktorom horenie zasahuje lesný porast, lesnú pôdu alebo organický materiál nachádzajúci sa v lese. Jeho vznik je výsledkom vzájomného pôsobenia iniciačného zdroja, paliva a podmienok okolitého prostredia. Samotný iniciačný zdroj môže vyvolať krátkodobé horenie, o ďalšom rozvoji však rozhoduje najmä to, či je okolité palivo dostatočne suché, zapáliteľné a priestorovo usporiadané tak, aby sa naň mohol preniesť plameň alebo potrebné množstvo tepla (Rothermel, 1972; Pyne et al., 1996; Keane, 2015). Rothermelov model vychádza práve z rovnováhy medzi teplom prenášaným do nehoreného paliva a energie potrebnej na jeho zapálenie.

V podmienkach Slovenska vzniká väčšina požiarov v prírodnom prostredí v súvislosti s ľudskou činnosťou. Medzi časté príčiny patrí vypaľovanie suchej vegetácie, spaľovanie rastlinných zvyškov, zakladanie ohňa vo voľnej prírode, fajčenie, používanie otvoreného ohňa a iskriace pracovné činnosti. Meteorologické podmienky spravidla nie sú priamym zdrojom iniciácie, zásadne však ovplyvňujú pripravenosť paliva na zapálenie. Suché a veterné počasie môže aj z relatívne slabého iniciačného zdroja vytvoriť podmienky na vznik požiaru, zatiaľ čo pri vysokej vlhkosti paliva môže rovnaký iniciačný zdroj zaniknúť bez ďalšieho šírenia horenia.

Nebezpečenstvo vzniku požiaru býva na Slovensku zvýšené najmä v skorom jarnom období. Po ústupe snehovej pokrývky zostáva na povrchu pôdy vrstva minuloročnej trávy, bylenných zvyškov, lístia, ihličia a drobných vetvičiek. Nová vegetácia ešte nevytvára súvislý zelený kryt a jemné odumreté palivo je vystavené priamemu slnečnému žiareniu a prúdeniu vzduchu. Jeho vlhkosť sa preto môže znížiť v priebehu krátkeho času. Ak je súčasne prítomný iniciačný zdroj, riziko vzniku požiaru sa zvyšuje. Jarné požiare sa často začínajú na trávnatých alebo poľnohospodárskych plochách a do lesa prenikajú spravidla až počas ďalšieho šírenia.

V letnom období sa nebezpečenstvo vzniku požiaru zvyšuje najmä pri dlhšie trvajúcom nedostatku zrážok, vysokej teplote vzduchu, nízkej relatívnej vlhkosti a vetre. Krátkodobé suché počasie ovplyvňuje predovšetkým jemné odumreté palivo. Pri dlhšom suchu postupne klesá aj vlhkosť hrubších drevných častí, organických vrstiev pôdy a živej vegetácie. Zvyšuje sa tak nielen riziko vzniku požiaru, ale po jeho iniciácii aj podiel palivového komplexu, ktorý sa môže zapojiť do horenia.

Horenie je oxidačný proces sprevádzaný uvoľňovaním tepla a spravidla aj svetla. Na jeho vznik je potrebná súčasná prítomnosť horľavého materiálu, oxidačného činidla a dostatočného množstva energie. V lesnom prostredí je horľavým materiálom lesné palivo, oxidačným činidlom kyslík obsiahnutý vo vzduchu a potrebnú energiu môže poskytnúť otvorený plameň, iskra, žeravá častica, horúci povrch alebo elektrický výboj.

Prítomnosť týchto troch zložiek sama osebe nezaručuje vznik samostatne sa šíriaceho požiaru. Iniciačný zdroj musí na palivo pôsobiť dostatočne dlho a s dostatočnou intenzitou, aby sa materiál zohrial, odparila sa z neho časť vody a začal sa tepelný rozklad jeho organických zložiek. Ak teplo vznikajúce

pri počiatočnom horení nestačí na prípravu susedného paliva, plameň zanikne a požiar sa ďalej nerozšíri (Drysdale, 2011).

V prvej fáze tepelného namáhania sa prijatá energia spotrebúva na zohrievanie paliva a odparovanie vody. Vlhké palivo preto potrebuje na zapálenie viac energie a dlhší čas pôsobenia iniciačného zdroja než suché palivo. Význam vlhkosti je zvlášť výrazný pri jemných palivových časticiach, ktoré rýchlo reagujú na zmeny teploty a relatívnej vlhkosti okolitého vzduchu.

Po vysušení a ďalšom raste teploty nastáva tepelný rozklad materiálu. Z celulózy, hemicelulóz, lignínu a ďalších zložiek rastlinnej hmoty sa uvoľňujú plynné a kvapalné produkty a vytvára sa pevný uhlíkatý zvyšok. Plynné produkty sa po zmiešaní so vzduchom môžu zapáliť a horieť nad povrchom pevného materiálu. Plameňové horenie teda prebieha prevažne v plynnej fáze, zatiaľ čo pevná hmotá poskytuje produkty potrebné na jeho udržanie (Drysdale, 2011).

Po úbytku prchavých látok môže zostávajúci uhlíkatý materiál pokračovať v bezplameňovom horení alebo žeravení. Tento spôsob horenia je významný najmä pri hrabanke, humuse, rašeline, pňoch, koreňových systémoch a hrubom ležiacom dreve. Žeravenie je pomalšie než plameňové horenie, môže však pretrvávať dlhý čas a pokračovať aj po zániku viditeľných plameňov. Skryté ohniská v pňoch, koreňoch alebo podpovrchových organických vrstvách patria medzi príčiny opätovného rozhorenia požiariska.

Ďalšie šírenie požiaru je možné iba vtedy, keď sa časť tepla uvoľneného horiacim palivom preniesie na palivo, ktoré ešte nehori. V prírodnom prostredí sa uplatňuje vedenie, prúdenie a sálanie. Ich význam sa mení podľa druhu paliva, intenzity horenia, sklonu terénu a rýchlosti vetra.

Vedenie tepla je významné predovšetkým vo vnútri jednotlivých palivových častíc a v miestach ich vzájomného kontaktu. Rastlinné materiály majú pomerne nízku tepelnú vodivosť, preto vedenie spravidla nie je hlavným mechanizmom šírenia povrchového požiaru na väčšiu vzdialenosť. Dôležité je však pri postupnom prehrievaní hrubšieho dreva a prenose tepla do jeho vnútra.

Prúdenie prenáša teplo pohybom horúcich plynov. Nad požiarom vzniká vzostupný prúd, ktorý zohrieva vyššie položené časti vegetácie. Na svahu sa plamene a horúce plyny približujú k palivu nachádzajúcemu sa nad požiarom. Palivo sa tak predhrieva, vysušuje a rýchlejšie dosahuje podmienky potrebné na zapálenie. Z tohto dôvodu sa požiar pri porovnateľnom palive a počasí spravidla šíri rýchlejšie nahor po svahu než po rovine alebo smerom nadol.

Vietor nakláňa plamene k nehorenému palivu, predlžuje jeho tepelnú expozíciu a podporuje prísun kyslíka do oblasti horenia. Zároveň môže prenášať horiace alebo žeravé častice pred hlavné čelo požiaru. Po dopade na suché jemné palivo môžu tieto častice vytvoriť nové ohniská. Bodové požiare umožňujú prekonať komunikácie, vodné toky, pásy bez vegetácie a iné prekážky, ktoré by inak mohli spomaliť súvislý postup plameňa (Pyne et al., 1996).

Sálanie prenáša energiu bez priameho kontaktu medzi horiacim a nehoreným materiálom. Jeho význam rastie s teplotou, rozmermi plameňa a veľkosťou žiariaceho povrchu. Pri intenzívnom požiari môže sálavý tepelný tok predhrievať palivo pred čelom požiaru a podporovať zapálenie krovín, spodných vetiev a korunového paliva.

Rothermel (1972) vyjadril rýchlosť šírenia povrchového požiaru ako výsledok vzťahu medzi tokom tepla prenášaným do nehoreného paliva a množstvom energie potrebnej na jeho zapálenie. Model zohľadňuje vlastnosti palivového lôžka, vlhkosť paliva, vietor a sklon svahu. Napriek zjednodušeniam sa stal základom viacerých systémov používaných na predpovedanie správania povrchových požiarov.

Podľa vrstvy palivového komplexu, v ktorej prebieha horenie, sa rozlišuje podzemný, povrchový a korunový požiar. Počas jednej udalosti sa môžu tieto formy kombinovať a vzájomne na seba nadväzovať.

Podzemný požiar zasahuje organickú hmotu pod povrchom pôdy. Horieť môže čiastočne rozložená hrabanka, humus, rašelina, korene alebo podpovrchové časti pŕov. Horenie býva prevažne bezplameňové, šíri sa pomaly a môže pretrvávať dlhý čas. Zistenie jeho skutočného rozsahu je náročné, pretože aktívne ohniská môžu byť prekryté pôdou alebo vrstvou nerozloženého materiálu.

Povrchový požiar sa šíri opadom, hrabankou, trávou, bylinnou vegetáciou, krovínami, jemnými a hrubšími vetvami, ležiacim drevom a ďalším palivom nachádzajúcim sa pri povrchu pôdy. Ide o najčastejšiu formu požiaru v lesnom prostredí. Jeho správanie závisí najmä od množstva, vlhkosti a spojitosti jemného povrchového paliva, ale aj od vetra a sklonu terénu.

Intenzita povrchového požiaru sa v priestore mení. Na miestach s vlhkým alebo nesúvislým palivom sa môže požiar spomaliť alebo zaniknúť. V súvislej vrstve suchej trávy, ihličia, drobných vetiev alebo ťažbových zvyškov sa môže jeho intenzita rýchlo zvýšiť. Ak sa nad povrchovou vrstvou nachádzajú kry, prirodzené zmladenie, mladé stromy alebo nízko nasadené vetvy, vznikajú podmienky na vertikálny prenos horenia.

Korunový požiar zasahuje živé a odumreté jemné palivo v korunách stromov. Môže ísť o zapálenie jednotlivých korún, pasívny korunový požiar alebo aktívny korunový požiar. Pri pasívnom korunovom požiaru horia jednotlivé stromy alebo skupiny stromov a ďalší postup je závislý od povrchového požiaru. Aktívny korunový požiar sa šíri súvislo korunovou vrstvou.

Prechod povrchového požiaru do korún závisí od intenzity povrchového horenia, výšky bázy koruny, vlhkosti jemného korunového paliva a prítomnosti rebríkového paliva. Udržanie aktívneho korunového požiaru následne závisí od dostatočného množstva a horizontálnej spojitosti korunového paliva. Van Wagner (1977) odlíšil podmienky iniciácie horenia korún od podmienok potrebných na jeho ďalšie šírenie. Jeho koncepcia sa stala základom viacerých postupov hodnotenia vzniku a rozvoja korunového požiaru.

Správanie požiaru vyjadruje spôsob, akým požiar reaguje na palivo, meteorologické podmienky a reliéf. Medzi základné charakteristiky patrí rýchlosť šírenia, intenzita čela požiaru, dĺžka a výška plameňa, smer postupu, tvar požiariska, množstvo spotrebovaného paliva a spôsob zapojenia jednotlivých palivových vrstiev (Byram, 1959; Rothermel, 1972; Scott a Burgan, 2005).

Rýchlosť šírenia vyjadruje vzdialenosť, o ktorú sa požiar posunie za jednotku času. Na celom obvode požiariska nie je rovnaká. Najrýchlejšie sa požiar spravidla šíri v smere vetra alebo nahor po svahu. Táto časť sa označuje ako čelo požiaru. Na bočných stranách býva postup pomalší a zadná časť sa pohybuje proti hlavnému smeru šírenia.

Pri rovnomernom palive, stálom vetre a na rovnom teréne nadobúda požiarisko približne eliptický tvar. V reálnom prostredí sa však palivo, vietor aj reliéf menia. Tvar obvodu ovplyvňujú cesty, vodné toky, skalné plochy, rúbaniská, kalamitné územia, zmeny drevinového zloženia, údolia a lokálne prúdenie vzduchu.

Intenzita čela požiaru vyjadruje množstvo tepla uvoľneného za jednotku času na jednotku dĺžky aktívneho požiarneho frontu. Byram (1959) ju vyjadril vzťahom (1):

$$I = H \cdot w \cdot r \quad (1)$$

kde:

I – intenzita čela požiaru ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$),

H – efektívna výhrevnosť paliva ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),

w – množstvo paliva spotrebovaného v aktívnej zóne horenia ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$),

r – rýchlosť šírenia požiaru ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Zo vzťahu vyplýva, že intenzita čela požiaru závisí od množstva paliva, ktoré sa skutočne spotrebuje v aktívnej zóne horenia, od jeho energetických vlastností a od rýchlosti šírenia. Vysoká intenzita preto nemusí byť iba dôsledkom veľkého celkového množstva paliva. Môže vzniknúť aj pri rýchlom šírení jemným, suchým a dobre prevzdušneným palivom (Byram, 1959).

Efektívna výhrevnosť paliva (H) vyjadruje množstvo energie, ktoré sa môže uvoľniť pri spaľovaní jednotkovej hmotnosti paliva za reálnych podmienok požiaru. Nejde preto automaticky o hodnotu spalného tepla alebo výhrevnosti stanovenú laboratórne pri úplnom spálení suchej vzorky. Pri požiari v prírodnom prostredí sa časť energie spotrebuje na ohrev paliva, odparenie vody a priebeh endotermických procesov tepelného rozkladu. Hodnota efektívnej výhrevnosti je preto ovplyvnená najmä obsahom vody v palive, chemickým zložením paliva a účinnosťou spaľovania.

So zvyšujúcim sa obsahom vody v palive sa znižuje množstvo energie využiteľné na predohrev a zapálenie paliva nachádzajúceho sa pred čelom požiaru. Vlhké palivo zároveň spomaľuje rýchlosť šírenia požiaru. Obsah vody tak môže ovplyvňovať intenzitu čela požiaru prostredníctvom dvoch členov rovnice súčasne – efektívnej výhrevnosti a rýchlosti šírenia.

Veličina (w) nevyjadruje celkové množstvo paliva prítomného na jednotke plochy. Zahŕňa iba tú časť paliva, ktorá sa spotrebuje v aktívnej plameňovej zóne počas prechodu čela požiaru. Palivo, ktoré zostane nezhorieť alebo pokračuje v tlení po prechode čela, sa do výpočtu Byramovej intenzity nezahŕňa. Rozlíšenie medzi celkovým množstvom paliva a množstvom paliva spotrebovaným v aktívnej zóne je dôležité najmä pri lesných palivových komplexoch obsahujúcich hrubé drevné zvyšky, rozkladajúce sa drevo, humusové vrstvy alebo organické pôdne horizonty. Tieto zložky môžu horieť alebo tlieť dlhý čas, ale nemusia významne prispievať k okamžitému výkonu postupujúceho čela požiaru.

Rýchlosť šírenia požiaru (r) predstavuje dynamickú zložku rovnice. Ovplyvňuje ju najmä druh, množstvo, priestorová kontinuita a obsah vody v palive, rýchlosť a smer vetra, sklon terénu a vzájomné pôsobenie požiaru s atmosférou. Pretože rýchlosť šírenia vstupuje do rovnice priamo, jej zvýšenie pri nezmenenej efektívnej výhrevnosti a množstve spotrebovaného paliva spôsobí úmerné zvýšenie intenzity čela požiaru.

Z rovnice zároveň vyplýva, že vysoká intenzita nemusí byť dôsledkom iba vysokého množstva paliva. Môže vzniknúť aj pri relatívne menšom množstve jemného paliva, pokiaľ sa požiar šíri veľmi rýchlo. Naopak, požiar v prostredí s veľkým množstvom paliva nemusí dosiahnuť vysokú intenzitu čela, ak je palivo vlhké, priestorovo nespojité alebo horí prevažne pomalým tlením. Intenzitu čela požiaru preto nemožno odvodzovať len z palivového zaťaženia bez zohľadnenia podmienok šírenia.

Súčasný výskum potvrdzuje, že intenzita čela požiaru môže byť výrazne priestorovo aj časovo premenlivá. Pri experimentálnom požiari v krovinovom poraste boli pomocou bezpilotných leteckých prostriedkov, termovízných záznamov a údajov laserového skenovania identifikované rozdiely intenzity rádovo v priebehu niekoľkých metrov a sekúnd. Lokálne hodnoty pritom presahovali $40\,000\text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$, zatiaľ čo priemerná intenzita celého sledovaného úseku bola približne $14\,300\text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ (Valencia et al., 2023). Tieto výsledky poukazujú na obmedzenia používania jedinej priemernej hodnoty na charakterizovanie celého požiarneho frontu.

Intenzita čela požiaru úzko súvisí s dĺžkou plameňa. Dĺžka plameňa sa preto v operatívnej praxi často používa ako vizuálne pozorovateľný ukazovateľ intenzity. Medzi oboma veličinami však nejde o univerzálny a úplne jednoznačný vzťah. Geometria plameňa závisí aj od hĺbky plameňovej zóny, vetra, sklonu terénu, druhu paliva a spôsobu šírenia požiaru. Finney et al. (2023) upozorňujú, že pri určovaní vzťahu medzi dĺžkou plameňa a intenzitou nemožno zanedbať hĺbku plameňovej zóny najmä v prípadoch, keď jej rozmery nie sú malé v porovnaní s dĺžkou plameňa.

Na predpovedanie správania povrchového požiaru sa používajú palivové modely, ktoré zjednodušene vyjadrujú vlastnosti paliva rozhodujúceho pre jeho šírenie. Scott a Burgan (2005) vytvorili súbor 40 štandardných palivových modelov určených na použitie s Rothermelovým modelom. Modely sú členené podľa charakteru palivového komplexu a vrstvy, ktorá riadi šírenie požiaru, nie iba podľa hlavnej dreviny alebo názvu porastu.

Správanie požiaru v prírodnom prostredí je výsledkom spoločného pôsobenia paliva, počasia a reliéfu. Žiadnu z týchto zložiek nemožno hodnotiť úplne samostatne, pretože ich účinky sa navzájom dopĺňajú a môžu sa zosilňovať.

Palivo určuje, či je v priestore prítomný materiál schopný zapálenia, aké množstvo energie sa môže pri jeho horení uvoľniť a či medzi jednotlivými palivovými časťami existuje spojenie umožňujúce ďalšie šírenie. Vietor mení polohu plameňov, prenos tepla, prísun kyslíka, smer šírenia a vzdialenosť prenosu žeravých častíc. Reliéf ovplyvňuje vzájomnú polohu plameňa a paliva a súčasne vytvára miestne rozdiely v oslnení, teplote, vlhkosti a prúde vzduchu.

Reliéf patrí medzi relatívne stabilné činitele. Najvýznamnejšie sú sklon a orientácia svahu, nadmorská výška, tvar terénu a poloha v doline, na chrbte alebo v sedle. Požiar sa spravidla šíri rýchlejšie nahor po svahu, pretože plamene a horúce plyny sa približujú k vyššie položenému palivu. Orientácia svahu ovplyvňuje množstvo prijatého slnečného žiarenia a rýchlosť vysušovania vegetácie. Výsledný stav však závisí aj od zatienenia porastom, nadmorskej výšky, pôdných pomerov a miestneho prúdenia vzduchu.

Počasie je dynamickou zložkou požiarneho prostredia. Vietor priamo ovplyvňuje rýchlosť a smer šírenia. Teplota a relatívna vlhkosť vzduchu, zrážky a slnečné žiarenie menia vlhkosť jemného paliva a tým aj nebezpečenstvo vzniku požiaru. Pri dlhšie trvajúcom suchu sa mení aj vlhkosť hrubších palivových frakcií, organických pôdných vrstiev a živej vegetácie.

Palivo je z uvedených troch zložiek najviac priestorovo premenlivé a zároveň jediné, ktoré možno priamo ovplyvňovať hospodárskymi a preventívnymi opatreniami. Jeho množstvo a usporiadanie sa mení ťažbou, odstraňovaním zvyškov, prerezávkou, vyvetvovaním, redukciou podrastu, kalamitami, prirodzenou mortalitou a rozkladom. Účinok opatrenia závisí od toho, ktorú palivovú vrstvu mení a či znižuje množstvo paliva, jeho horizontálnu spojitosť alebo vertikálne prepojenie povrchovej vrstvy s korunami.

Pri hodnotení požiarov je preto potrebné oddeliť podmienky ich vzniku od správania po iniciácii. Nebezpečenstvo vzniku požiaru a riziko vzniku požiaru sa viažu na možnosť zapálenia paliva. Rýchlosť šírenia, intenzita, dĺžka plameňa a prechod do korún charakterizujú správanie požiaru, ktorý už vznikol. Toto rozlíšenie sa zachováva aj v ďalších kapitolách monografie.

1.2. Lesné palivo ako súčasť požiarneho prostredia

Lesné palivo tvorí živá a odumretá organická hmota nachádzajúca sa v lesnom prostredí, ktorá je za určitých podmienok schopná zapálenia a horenia. Zahŕňa materiál uložený na povrchu pôdy, v organických pôdných vrstvách, v bylinnom a krovinovom poschodí, v prirodzenom zmladení, na kmeňoch a vo vetvách a korunách stromov. Z hľadiska požiaru pritom nie je rozhodujúce iba to, či sa organická hmota v poraste nachádza, ale najmä to, či je pri konkrétnych podmienkach dostupná pre zapálenie a následné horenie (Brown a Smith, 2000; Sandberg et al., 2001; Keane, 2015).

Pojem lesné palivo nemožno stotožňovať s celkovou biomasou lesného ekosystému. Biomasa zahŕňa všetku živú a odumretú organickú hmotu bez ohľadu na jej bezprostredný význam pre vznik a správanie požiaru. Palivo predstavuje tú časť biomasy, ktorá sa môže pri pôsobení iniciačného zdroja alebo rozvíjajúceho sa požiaru zapojiť do horenia. Rozdiel medzi celkovou biomasou a palivom závisí od veľkosti a polohy materiálu, jeho vlhkosti, stupňa rozkladu, prevzdušnenia a od intenzity tepelného pôsobenia. Celý kmeň živého stromu je súčasťou biomasy porastu, pri povrchovom požiari sa však spravidla nezapája do horenia v rovnakom rozsahu ako ihličie, lístie, jemné vetvy alebo spodné časti koruny.

Dostupnosť paliva pre horenie nie je stálou vlastnosťou. Tá istá palivová zložka môže byť počas vlhkého obdobia ťažko zapáliteľná a po niekoľkých dňoch suchého počasia sa môže stať rozhodujúcou pre vznik a šírenie požiaru. Najvýraznejšie sa táto premenlivosť prejavuje pri jemnom odumretom palive, ktorého vlhkosť sa rýchlo prispôbuje podmienkam okolitého vzduchu. Pri hrubších palivových časticiach prebieha výmena vody pomalšie a ich stav viac odráža dlhodobejší priebeh počasia (Fosberg, 1970; Nelson, 2001; Matthews, 2014).

Lesné palivo sa vyskytuje vo viacerých priestorových úrovniach. Na povrchu pôdy sa nachádza opad, hrabanka, suché byliny, trávy, šišky, kôra, vetvičky a ležiace drevo. V priestore nad povrchom ho tvoria živé a odumreté byliny, kry, prirodzené zmladenie, mladé stromy a spodné vetvy. V korunovej vrstve sa nachádzajú listy alebo ihličie, jemné vetvy, odumreté časti korún a ďalší materiál schopný horenia. V podpovrchových organických vrstvách môžu byť palivom korene, rozložená hrabanka, humusové horizonty, rašelina a podpovrchové časti pňov (Brown a Smith, 2000; Keane, 2015).

Jednotlivé vrstvy nie sú od seba úplne oddelené. Povrchové palivo vytvára základné podmienky na vznik a rozvoj väčšiny lesných požiarov. Ak sa nad ním nachádza súvislá vrstva krovín, mladých stromov alebo suchých spodných vetiev, môže sa požiar postupne preniesť do vyšších častí porastu. Tento vertikálny prenos závisí od intenzity povrchového horenia, vzdialenosti medzi palivovými vrstvami, ich vlhkosti a priestorovej spojitosti. Palivové zložky, ktoré umožňujú prenos požiaru z povrchu do korún, sa označujú ako rebríkové palivo (Scott a Reinhardt, 2001; Cruz et al., 2004).

Palivový komplex predstavuje súbor všetkých palivových zložiek, ktoré sa nachádzajú v určitej časti lesného prostredia a môžu ovplyvniť vznik alebo ďalšie správanie požiaru. Jeho charakter nie je určený iba druhovým zložením porastu. Význam má vek a štruktúra porastu, zakmenenie, zápoj, prítomnosť

podrastu, množstvo prirodzeného zmladenia, zásoba odumretého dreva, priebeh predchádzajúcich hospodárskych zásahov a stav povrchovej organickej vrstvy.

Dva porasty s rovnakou hlavnou drevinou a podobným vekom môžu mať rozdielny palivový komplex. V jednom môže byť povrch pokrytý súvislou vrstvou suchého ihličia a jemných vetiev, zatiaľ čo v druhom môže byť opad zhutnený, vlhkejší a prerušovaný plochami bez horľavého materiálu. Rozdiely môžu vzniknúť aj v množstve krovín, výške korunovej bázy, prítomnosti suchých spodných vetiev a v horizontálnom prepojení korún. Lesnícke údaje o drevine, veku alebo zakmenení preto neposkytujú úplnú informáciu o palivových podmienkach a musia byť doplnené o ďalšie charakteristiky (Keane, 2015).

Zloženie palivového komplexu sa mení v priebehu vývoja porastu. V mladých porastoch môže byť významné husté prirodzené zmladenie, nízko nasadené koruny a vysoká vertikálna spojitosť. V zapojených porastoch sa môže znížiť bylinná a krovinná vrstva, zároveň sa však postupne hromadí opad a odumreté vetvy. V starších alebo narušených porastoch narastá zásoba ležiaceho a stojaceho odumretého dreva. Po ťažbe alebo veternej kalamite sa na povrchu môže krátkodobo zvýšiť množstvo jemného aj hrubého drevného paliva.

Pri hodnotení palivového komplexu je preto potrebné rozlišovať jednotlivé zložky podľa ich funkcie pri požiari. Jemné povrchové palivo býva rozhodujúce pre zapálenie a rýchlosť počiatočného šírenia. Hrubé odumreté drevo ovplyvňuje najmä trvanie horenia, množstvo uvoľneného tepla a náročnosť doháňania. Rebríkové palivo vytvára podmienky na vertikálny prenos horenia a korunové palivo rozhoduje o možnosti ďalšieho šírenia požiaru v korunách stromov.

Veľkosť palivových častíc patrí medzi základné vlastnosti, ktoré ovplyvňujú ich reakciu na meniace sa podmienky prostredia. Jemné palivo má vysoký pomer povrchu k objemu. Teplo a vodná para sa preto vymieňajú na veľkej ploche vzhľadom na jeho hmotnosť. Palivo sa rýchlo zohrieva, vysušuje a po zmene meteorologických podmienok opäť prijíma vodu. Patria sem najmä ihličie, lístie, suché stebľa, drobné vetvičky a jemné odumreté časti bylín a krovín (Fosberg, 1970; Nelson, 2001).

Pri vhodnej vlhkosti sa jemné palivo ľahko zapáli a rýchlo odovzdáva teplo susedným časticiam. Ak je priestorovo súvislé, umožňuje vznik samostatne sa šíriaceho povrchového požiaru. Z tohto dôvodu má pri posudzovaní nebezpečenstva vzniku požiaru väčší význam než rovnaká hmotnosť hrubého dreva uložená v jednotlivých, navzájom oddelených kusoch.

Hrubé palivo má menší povrch v pomere k objemu a väčšiu tepelnú zotrvačnosť. Jeho vnútorná vlhkosť sa mení pomalšie a na zapálenie je spravidla potrebný dlhší čas pôsobenia tepla. Po zapálení však hrubé vetvy, pne a ležiace kmene môžu horieť alebo žeravieť dlhý čas. Ich význam rastie počas dlhotrvajúceho sucha a pri požiaroch s dostatočnou intenzitou na postupné prehrievanie väčších prierezov.

Hrubé palivo nemusí podstatne zrýchľovať pohyb čela požiaru, môže však zvyšovať celkovú spotrebu paliva, tepelný účinok na pôdu a dĺžku trvania udalosti. Po prechode čela zostáva zdrojom žeravých ohnísk a môže podporovať opätovné rozhorenie. Pri hodnotení požiarneho prostredia preto nemožno jemné a hrubé palivo zlúčiť do jedinej hodnoty bez rozlíšenia ich rozdielnej funkcie.

Živé palivo tvoria rastlinné časti, v ktorých prebiehajú fyziologické procesy. Patria sem živé listy a ihličie, vetvy, byliny, travy, kry, prirodzené zmladenie a živé časti stromov. Jeho vlhkosť je ovplyvnená dostupnosťou vody v pôde, fyziologickým stavom rastliny, fenologickou fázou, druhom vegetácie

a priebehom sucha. Živé palivo býva spravidla vlhšie než odumreté, nemožno ho však automaticky považovať za nehorľavé.

Pri dlhšom nedostatku vody môže obsah vody v živých rastlinných častiach výrazne klesnúť. Požiarne vlastnosti ovplyvňuje aj chemické zloženie. Živice, silice, vosky a ďalšie extraktívne látky môžu podporovať zapálenie a plameňové horenie aj pri relatívne vyššom obsahu vody. Rozdiely medzi rastlinnými druhmi preto nemožno vysvetľovať iba vlhkosťou (Dimitrakopoulos a Papaioannou, 2001; Jolly et al., 2012).

Odumreté palivo už nemá vlastnú fyziologickú reguláciu vody. Jeho vlhkosť sa mení podľa teploty, relatívnej vlhkosti vzduchu, zrážok, slnečného žiarenia, vetra a kontaktu s pôdou. Jemné odumreté častice môžu preschnúť počas niekoľkých hodín, zatiaľ čo hrubé drevo reaguje na zmeny prostredia počas dní až týždňov (Nelson, 2001; Matthews, 2014).

Pre modelovanie sa odumreté palivo často člení do časových tried 1 h, 10 h, 100 h a 1 000 h. Označenie vyjadruje približnú rýchlosť, s akou sa vlhkosť palivovej častice približuje k novej rovnovážnej hodnote po zmene okolitého prostredia. Nejde o presný čas úplného vysušenia. Jednotlivé triedy sú spojené s rozsahom priemerov palivových častíc a používajú sa na odlišenie paliva s rýchlou a pomalšou vlhkosťou odozvou (Fosberg, 1970; Bradshaw et al., 1984).

Živé a odumreté palivo sú v poraste priestorovo prepojené. Odumreté vetvičky, suché listy alebo ihličie môžu zostať zachytené v živých krovinách a zvyšovať ich zapáliteľnosť. Suché spodné vetvy stromov vytvárajú cestu pre prenos horenia klivej korunovej biomase. Po odumretí stromov môžu suché ihlice určitý čas zostať v korunách, neskôr opadajú na povrch a menia charakter povrchového paliva. Stav palivového komplexu po disturbancii je preto časovo premenlivý.

O správaní paliva nerozhoduje iba jeho hmotnosť a druhové zloženie. Rovnako dôležité je priestorové usporiadanie palivových častíc. Materiál musí byť uložený dostatočne blízko, aby sa medzi susednými časticami mohlo prenášať teplo, a zároveň dostatočne voľne, aby bol zabezpečený prístup kyslíka a pohyb horúcich plynov.

Pri veľmi riedkom uložení vznikajú medzi palivovými časticami veľké medzery a plameň sa nemusí preniesť na ďalší materiál. Pri nadmernom zhutnení je obmedzené prevzdušnenie, prenos tepla do vnútra vrstvy a uvoľňovanie plynných produktov. Priaznivé podmienky na rýchle plameňové horenie preto často vznikajú v primerane voľnom a súvislom palivovom lôžku, aké môže vytvárať suché ihličie, tráva alebo jemné vetvičky (Rothermel, 1972; Anderson, 1982).

Hĺbka palivového lôžka spolu s množstvom paliva určuje jeho objemovú hustotu. Rovnaká hmotnosť paliva rozložená v tenkej zhutnenej vrstve má inú priestorovú štruktúru než rovnaká hmotnosť uložená vo vysokej vrstve trávy alebo krovín. Rozdielne usporiadanie ovplyvňuje prístup vzduchu, veľkosť plameňa, prenos tepla a rýchlosť šírenia.

Dôležitý je aj pomer povrchu palivovej častice k jej objemu. V palivových modeloch sa tento parameter používa na vyjadrenie jemnosti paliva. Vysoký pomer je typický pre ihličie, listy, stebľa a drobné vetvičky, nízky pomer pre hrubé konáre a kmene. Parameter ovplyvňuje rýchlosť výmeny tepla a vody medzi palivom a prostredím a patrí medzi základné vstupy Rothermelovho modelu šírenia povrchového požiaru (Rothermel, 1972).

Lesné palivo je priestorovo veľmi premenlivé. Jeho množstvo a usporiadanie sa môže meniť nielen medzi rôznymi typmi porastov, ale aj v rámci jednej jednotky priestorového rozdelenia lesa. Rozdiely vznikajú medzi miestami pod korunou a v porastových medzerách, medzi okrajom a vnútrom porastu, medzi suchšími vyvýšenými polohami a vlhšími depresiami, ako aj medzi obhospodarovanými a dlhodobo nezasahovanými časťami lesa.

Na okraji porastu býva palivo viac vystavené slnečnému žiareniu a prúdeniu vzduchu. Môže sa tam vyskytovať hustejšia bylinná a krovinná vegetácia, ktorá po vysušení vytvára súvislé jemné palivo. Vo vnútri zapojeného porastu býva mikroklima vlhšia, zároveň sa tam však môže hromadiť hrubšia vrstva opadu a odumretých vetiev. Skutočný účinok okraja závisí od orientácie, veku okraja, štruktúry porastu, reliéfu a miestnych podmienok.

Časová premenlivosť má krátkodobú aj dlhodobú zložku. Krátkodobé zmeny spôsobuje najmä počasie a prejavujú sa zmenou vlhkosti a zapáliteľnosti paliva. Dlhodobé zmeny súvisia s rastom a vývojom porastu, opadom, mortalitou, rozkladom, hospodárskymi zásahmi a disturbanciami. Palivové podmienky zaznamenané v určitom roku preto nemožno považovať za trvalú vlastnosť územia.

Po veternej alebo podkôrnikovej kalamite sa palivový komplex vyvíja v niekoľkých etapách. Bezprostredne po poškodení môže narásť množstvo jemného paliva v korunách a v spodných vrstvách. Neskôr opadávajú ihlice a jemné vetvy, čím sa zvyšuje množstvo povrchového paliva. Postupne sa lámu väčšie vetvy a kmene a narastá množstvo hrubého ležiaceho dreva. Súčasne sa obnovuje bylinná, krovinná a stromová vegetácia. Každá etapa vytvára odlišné podmienky pre vznik a správanie požiaru (Jenkins et al., 2014; Keane, 2015).

Palivový model je zjednodušeným matematickým alebo opisným vyjadrením palivového komplexu určeným na modelovanie správania požiaru. Nezahŕňa všetky zložky biomasy ani všetky podrobnosti o poraste. Obsahuje tie vlastnosti paliva, ktoré sú potrebné pre konkrétny výpočtový postup.

V modeloch správania povrchového požiaru sa používajú najmä množstvo paliva rozdelené do veľkostných a časových tried, množstvo živého bylinného a krovinného paliva, hĺbka palivového lôžka, pomer povrchu k objemu, tepelný obsah, obsah minerálnych látok a vlhkosť vyhasnutia. Tieto parametre umožňujú odhadovať rýchlosť šírenia, intenzitu čela a ďalšie charakteristiky povrchového požiaru (Rothermel, 1972; Scott a Burgan, 2005).

Palivový model sa nemá priradovať iba podľa hlavnej dreviny alebo názvu lesného typu. Rozhodujúca je vrstva, ktorá pri očakávaných podmienkach riadi šírenie požiaru. V lesnom poraste to môže byť opad a jemné vetvy, ale aj trávnaté palivo v presvetlenom poraste, krovinná vegetácia alebo ťažbové zvyšky. Rovnaký druh porastu preto môže byť v závislosti od svojho aktuálneho stavu priradený k rozdielnym palivovým modelom (Anderson, 1982; Scott a Burgan, 2005).

Pri hodnotení korunového požiaru sa povrchový palivový model dopĺňa o charakteristiky korunovej vrstvy. Patrí medzi ne výška korunovej bázy, výška porastu, zápoj a objemová hustota korunového paliva. Na posúdenie vertikálneho prenosu je potrebné zohľadniť aj rebríkové palivo, ktoré tradičné priemerné porastové údaje často nedokážu dostatočne zachytiť (Scott a Reinhardt, 2001; Cruz et al., 2004).

Palivový model je teda účelovým zjednodušením skutočného palivového komplexu. Jeho správnosť nemožno posudzovať podľa toho, či podrobne opisuje všetku vegetáciu, ale podľa toho, či primerane zastupuje palivo rozhodujúce pre sledovaný proces. Pri hodnotení nebezpečenstva vzniku požiaru musí

správne zachytiť najmä prítomnosť a stav paliva, v ktorom môže dôjsť k iniciácii. Pri modelovaní správania požiaru musí vystihnúť vlastnosti paliva dôležité pre jeho ďalšie šírenie a intenzitu.

Lesné palivo je preto potrebné chápať ako dynamický a priestorovo usporiadaný systém. Jeho význam nemožno odvodiť z jedného údaja o biomase, drevine alebo množstvo paliva. Hodnotenie musí zohľadniť druh paliva, jeho živý alebo odumretý stav, rozmery častíc, obsah vody, množstvo, polohu a spojitosť. Na tomto základe možno vytvoriť metodiky terénneho zisťovania, laboratórneho hodnotenia požiarnych vlastností paliva, mapovania a tvorby palivových modelov, ktoré sú rozpracované v ďalších kapitolách monografie.

1.3. Štruktúra lesného paliva a jeho priestorové usporiadanie

Štruktúra lesného paliva vyjadruje zloženie palivového komplexu a spôsob, akým sú jeho jednotlivé časti rozmiestnené na povrchu pôdy a vo vertikálnom profile porastu. Nejde iba o množstvo biomasy alebo palivovú množstvo. Pre vznik a ďalší priebeh požiaru je dôležité, ktoré palivové zložky sú prítomné, aké majú rozmery a požiarne vlastnosti, v akej vrstve sa nachádzajú a či sú navzájom prepojené. Rovnaká hmotnosť paliva preto môže v rozdielne usporiadaných porastoch vytvárať odlišné podmienky na zapálenie aj šírenie požiaru (Keane, 2015; Prichard et al., 2023).

Tradičné hodnotenie lesného paliva vychádza najmä z plošného stanovenia množstva paliva, hĺbky palivového lôžka a zastúpenia jednotlivých veľkostných tried. Takýto opis je potrebný pri modelovaní povrchového požiaru, neposkytuje však úplnú informáciu o priestorovej heterogenite paliva. Súčasný výskum preto čoraz viac pracuje s trojrozmerným opisom palivového komplexu, v ktorom sa hodnotí poloha, objem, hustota a kontinuita paliva v horizontálnom aj vertikálnom smere. Trojrozmerná reprezentácia je potrebná najmä pri fyzikálne založených modeloch, ktoré simulujú vzájomné pôsobenie plameňa, vegetácie a prúdenia vzduchu (Prichard et al., 2023; Marcozzi et al., 2025).

Priestorové usporiadanie paliva možno posudzovať na viacerých mierkových úrovniach. Na úrovni jednotlivých častíc je významný jej rozmer, tvar, orientácia a kontakt s okolitým materiálom. Na úrovni palivového lôžka rozhoduje vzdialenosť medzi časticami, hĺbka vrstvy, objemová hustota a prítomnosť medzier. Na úrovni porastu sa hodnotí rozloženie povrchového, rebríkového a korunového paliva. Na krajinej úrovni je dôležitá nadväznosť palivových typov, veľkosť súvislých palivových plôch a ich prerušenie cestami, vodnými tokmi, skalnými plochami, poľnohospodárskou pôdou alebo inými územiami s nízkym množstvom paliva.

Rozdiel medzi týmito úrovňami je podstatný aj z metodického hľadiska. Údaj získaný na malej odberovej ploche môže podrobne opísať povrchové palivo, ale nemusí byť reprezentatívny pre celý porast. Priemerná porastová charakteristika môže vystihnúť všeobecný stav, no nezachytí miestne nahromadenie paliva, medzery ani zvislé prepojenie vegetačných vrstiev. Priestorové zovšeobecnenie preto musí zodpovedať účelu hodnotenia a kvalite vstupných údajov. Prichard et al. (2023) upozorňujú, že heterogenita paliva a rozdielne mierky jeho pozorovania patria medzi hlavné zdroje neistoty pri modelovaní požiaru a emisií.

Horizontálne usporiadanie vyjadruje rozmiestnenie palivových častíc alebo palivových vrstiev v približne rovnakej výške nad povrchom. Z hľadiska šírenia požiaru je rozhodujúce, či palivo vytvára súvislú vrstvu, alebo je rozdelené medzerami, ktoré obmedzujú prenos tepla a plameňa.

Súvislú vrstvu môžu vytvárať suché trávy, ihličie, lístie, nízke kry alebo jemné ťažbové zvyšky. Ak sú jednotlivé častice uložené dostatočne blízko, teplo uvoľnené pri horení jednej časti pripravuje na zapálenie susedné palivo. Požiar sa môže šíriť aj pri pomerne malom množstve paliva, pokiaľ je jemné palivo suché a priestorovo súvislé. Naopak, veľké množstvo materiálu rozdeleného do izolovaných skupín nemusí zabezpečiť súvislý postup čela požiaru.

Kontinuita paliva nie je absolútnou vlastnosťou porastu. Medzera, ktorá zastaví požiar s nízkou intenzitou, nemusí predstavovať účinnú prekážku pri silnom vetre, dlhších plameňoch alebo prenose žeravých častíc. Funkčný význam medzery preto závisí od jej šírky, výšky okolitej vegetácie, sklonu terénu a charakteristík už prebiehajúceho požiaru. Pri hodnotení horizontálneho usporiadania treba rozlišovať geometrickú kontinuitu paliva a jeho skutočnú schopnosť prenášať horenie.

Priestorová heterogenita sa často prejavuje aj v rámci jedného porastu. Množstvo a stav paliva sa líšia pod korunami, v medzerách, pri kmeňoch, na okrajoch porastu, pozdĺž ciest a na miestach predchádzajúcich zásahov. Pod zapojenou korunovou vrstvou môže byť opad hrubší, ale vlhší a zhutnenejší. V porastovej medzere môže byť množstvo paliva menšie, no vyššie zastúpenie suchej trávy a intenzívnejšie presychanie môže vytvárať priaznivejšie podmienky na vznik požiaru.

Na krajinej úrovni sa horizontálne usporiadanie prejavuje ako priestorová mozaika rôznych typov paliva. Jej význam sa neobmedzuje na podiel jednotlivých typov. Dôležitá je aj ich poloha, tvar a vzájomné prepojenie. Dlhý súvislý pás paliva v smere prevládajúceho vetra môže podporovať šírenie viac než rovnaká plocha rozdelená medzi niekoľko oddelených miest. Z toho vyplýva, že jednoduché štatistické vyjadrenie plošného podielu palivovej triedy nemusí postačovať na posúdenie priestorového potenciálu šírenia požiaru.

Vertikálne usporiadanie vyjadruje rozloženie paliva od povrchu pôdy po hornú časť korún stromov. V lesnom poraste možno rozlíšiť podpovrchové organické palivo, povrchové palivo, bylinnú a krovinovú vrstvu, prirodzené zmladenie, spodné vetvy a korunovú vrstvu. Ich vzájomná poloha rozhoduje o možnosti vertikálneho prenosu horenia.

Ak medzi povrchovým palivom a korunami existuje dostatočne veľká a palivovo prázdna medzera, povrchový požiar nemusí preniesť dostatok tepla na zapálenie korunového paliva. Túto vzdialenosť však nemožno určiť iba podľa priemernej výšky bázy koruny hlavnej stromovej vrstvy. Kry, mladé stromčeky, suché spodné vetvy a odumreté stojace stromy môžu vytvoriť medzivrstvy, ktoré vzdialenosť medzi povrchom a korunou funkčne skracujú.

Takéto vertikálne prepojenie sa označuje ako rebríkové palivo. Jeho zloženie sa medzi lesnými ekosystémami líši. V mladých alebo hustých ihličnatých porastoch ho môžu tvoriť potlačené jedince a nízko nasadené koruny. V presvetlených alebo zmiešaných porastoch môžu túto funkciu plniť kry, prirodzené zmladenie a vysoké byliny. Po poškodení sa môžu významným rebríkovým palivom stať suché konáre a odumreté stromčeky.

Viedma et al. (2024) uvádzajú, že bežne používané ukazovatele výšky korunovej bázy nedokážu dostatočne opísať počet, hrúbku a vzájomnú vzdialenosť palivových vrstiev pod korunou. Autori preto navrhli postup založený na profiloch hustoty listovej plochy odvodených z údajov laserového skenovania. Postup umožňuje identifikovať jednotlivé palivové vrstvy, medzery medzi nimi, výšku ich bázy a ich

vertikálnu hĺbku. Takéto údaje poskytujú presnejší obraz o rebríkovom palive než jeden priemerný údaj o výške korunovej bázy.

Vertikálna kontinuita je významná najmä pri posudzovaní možnosti prechodu povrchového požiaru do korún. Tento prechod však nezávisí iba od geometrického usporiadania paliva. Rozhodujúca je aj intenzita povrchového požiaru a vlhkosť jemného korunového paliva. Nízke koruny nemusia byť zapálené slabým povrchovým požiarom vo vlhkom palive, zatiaľ čo intenzívny požiar môže pri silnom vetre zasiahnuť aj vyššie položené korunové časti. Priestorovú štruktúru preto treba hodnotiť spolu s požiarnymi vlastnosťami a stavom paliva.

Hĺbka palivovej vrstvy vyjadruje zvislý rozmer priestoru, v ktorom je palivo uložené. Spolu s plošným množstvom paliva ovplyvňuje objemovú hustotu palivového lôžka. Rovnaké množstvo materiálu môže byť uložené v tenkej zhutnenej vrstve alebo rozptýlené vo väčšom objeme. Obe situácie poskytujú odlišné podmienky na prístup kyslíka, prenos tepla a šírenie plameňa.

Objemovú hustotu možno vo všeobecnej podobe vyjadriť ako podiel suchej hmotnosti paliva a objemu, v ktorom je palivo rozmiestnené (2):

$$\rho_b = \frac{m_d}{V_b} \quad (2)$$

kde:

ρ_b – objemová hustota palivovej vrstvy ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

m_d – suchá hmotnosť paliva (kg)

V_b – objem palivovej vrstvy (m^3)

Veľmi riedke palivové lôžko môže obsahovať veľké medzery, ktoré obmedzujú prenos plameňa medzi časticami. Pri veľmi vysokej hustote sa znižuje prevzdušnenie a prenikanie tepla do vnútra vrstvy. Najrýchlejšie šírenie preto nevzniká automaticky pri najvyššom množstve paliva, ale pri takej kombinácii množstva, hĺbky a usporiadania, ktorá vytvára dostatočný kontakt medzi časticami a súčasne umožňuje prúdenie vzduchu.

V trávnom palive môže aj nízka hmotnosť vytvoriť vysokú a dobre prevzdušnenú vrstvu. V zhutnenom listovom opade môže byť na rovnakej ploche uložená vyššia hmotnosť, pričom šírenie plameňa bude pomalšie. Pri krovinovom palive sa horľavé časti nachádzajú v objemovej vrstve s výraznými medzerami. Jeho charakteristika preto vyžaduje údaje o výške, pokryvnosti, hustote vetiev a podiele jemnej biomasy.

Orientácia palivových častíc ovplyvňuje zachytávanie tepla, prístup vzduchu aj možnosť kontaktu plameňa so susedným materiálom. Vodorovne uložený opad vytvára inú štruktúru ako vzpriamené stebľá tráv alebo rozvetvené kry. Pri vetre sa vzpriamené jemné palivo môže ohýbať v smere prúdenia a vytvárať súvislejšiu cestu pre šírenie plameňa.

Jemné konáre a ihličie v korunách vytvárajú priestorovo rozvetvený systém, v ktorom sa palivové častice nachádzajú v rôznych smeroch. Táto zložitosť sa v tradičných palivových modeloch nahrádza priemernými hodnotami pomeru povrchu k objemu, množstva paliva a objemovej hustoty. Pri fyzikálne založenom modelovaní je však potrebné zachytiť podrobnejšiu geometriu vegetácie.

Xi et al. (2023) využili pozemné laserové skenovanie na rozlíšenie a rekonštrukciu drevných zložiek paliva v trojrozmernom priestore. Ich postup umožnil identifikovať jednotlivé kmene a vetvy a odhadovať ich objem na úrovni stromu aj porastu. Takéto metódy predstavujú významný posun oproti tradičnému opisu založenému iba na priemerných výškach, priemeroch a plošných množstvách, pretože zachytávajú aj skutočné priestorové usporiadanie palivových prvkov.

Rozvoj laserového skenovania, fotogrametrie a výpočtových metód umožňuje postupne nahrádzať zjednodušený dvojrozmerný opis paliva trojrozmernými modelmi. Pozemné laserové skenovanie poskytuje veľmi podrobné údaje o spodných vegetačných vrstvách, kmeňoch a vetvách. Letecké a bezpilotné laserové skenovanie umožňuje zachytiť väčšie územie a opisovať výšku porastu, korunovú štruktúru a vertikálne rozdelenie vegetácie. Jednotlivé platformy sa líšia hustotou bodov, uhlom snímania, rozsahom tienenia a schopnosťou preniknúť do nižších častí porastu.

Trojrozmerné údaje nemožno automaticky považovať za priamy údaj o palive. Mračno bodov opisuje geometriu povrchov, od ktorých sa vrátil laserový impulz. Na odvodenie palivových charakteristík je potrebné oddeliť terén, kmene, vetvy a listovú alebo ihličnatú zložku, určiť objemové jednotky a vytvoriť vzťah medzi geometrickou štruktúrou a suchou hmotnosťou paliva. Presnosť výsledku závisí od hustoty a smeru skenovania, tienenia, klasifikačného algoritmu a kvality terénnych referenčných údajov.

Prichard et al. (2023) poukazujú na to, že súčasné modely požiaru a emisií pracujú s palivom na rozdielnych priestorových a časových mierkach. Jednou z hlavných výziev zostáva prepojenie podrobných meraní na ploche s priestorovo súvislými údajmi pre celý porast alebo krajinu. Trojrozmerné mapovanie preto nemá nahradiť terénny zber, ale vytvoriť spôsob, ako overené terénne vzťahy rozšíriť na väčšie územie.

Marcozzi et al. (2025) predstavili platformu FastFuels, ktorá spája inventarizačné, priestorové a diaľkovo snímané údaje a vytvára podrobné trojrozmerné palivové vstupy pre fyzikálne modely požiaru. Význam takéhoto prístupu spočíva najmä v možnosti meniť priestorové usporiadanie paliva a priamo hodnotiť účinok hospodárskych alebo preventívnych zásahov na simulované správanie požiaru.

Súčasný trojrozmerný model však nemožno bez overenia preniesť do každého typu lesa. Algoritmy vytvorené v riedkych ihličnatých porastoch môžu mať obmedzenú použiteľnosť v hustých zmiešaných alebo viacvrstvových porastoch. Rozdielne dreviny majú odlišnú štruktúru korún, vetvenie, tvar listov alebo ihličia a rozdielny podiel jemnej biomasy. Metodika musí preto uvádzať, pre aké porasty bola kalibrovaná a aké terénne údaje sa použili na jej overenie.

Pri mapovaní paliva treba dôsledne rozlišovať priestorové rozlíšenie výstupnej vrstvy a skutočnú informačnú podrobnosť vstupných údajov. Raster s bunkou 10×10 m neznamena, že všetky hodnoty boli zistené alebo overené na ploche 100 m^2 . Ak sa do takejto mriežky prevzorkuje údaj pôvodne vytvorený pre JPRL, klimatický grid alebo väčšiu obrazovú bunku, geometrické rozlíšenie sa síce zmení, ale nepribudne nová informácia.

Táto zásada je zvlášť dôležitá pri štruktúre paliva, ktorá je premenlivá na veľmi krátke vzdialenosti. Priemerná hodnota pre lesný porast môže „zakrývať“ miesta s vysokou koncentráciou rebríkového paliva alebo so súvislou vrstvou suchého povrchového materiálu. Na druhej strane podrobný bodový záznam nemusí byť reprezentatívny pre širšie územie. Výber rozlíšenia preto musí vychádzať zo zdroja údajov, účelu analýzy a miery priestorovej variability hodnoteného parametra.

Pri kombinovaní údajov s rozdielnou podrobnosťou je vhodné ku každej výslednej hodnote uchovávať informáciu o jej pôvode. Geodatabáza by mala rozlišovať hodnoty priamo merané, odvodené z diaľkového prieskumu Zeme, prevzaté z lesníckych databáz a priradené na základe klasifikačného pravidla. Takýto postup umožňuje posúdiť dôveryhodnosť výstupu a zabraňuje tomu, aby sa odvodený údaj interpretoval ako priame meranie.

Štruktúra paliva nie je stála. Krátkodobé zmeny sa prejavujú najmä vo vlhkosti a polohe jemných častíc. Vietor môže premiestňovať lístie a ihličie, sneh zhutňuje povrchovú vrstvu a rast vegetácie mení výšku a hustotu bylinného paliva. Dlhodobejšie zmeny súvisia s rastom porastu, opadom, mortalitou, rozkladom, hospodárskymi zásahmi a disturbanciami.

Po ťažbe sa môže znížiť korunová kontinuita alebo korunový zápoj, súčasne však na povrchu zostáva jemný a hrubý drevný materiál. Po veternej kalamite sa časť korunovej biomasy premiestni k povrchu a vytvorí zložitú priestorovú vrstvu. Po podkônikovej disturbancii môže jemné odumreté palivo určitý čas zostať v korunách a neskôr postupne opadávať. Každá etapa vývoja preto vytvára odlišnú horizontálnu a vertikálnu štruktúru paliva.

Aktualizácia palivových údajov by sa nemala riadiť iba pevným časovým intervalom. Potrebné je zohľadniť udalosti, ktoré palivový komplex výrazne menia. Patria medzi ne ťažba, kalamita, požiar, odstraňovanie podrastu, výstavba komunikácie, zmena využívania územia alebo rozsiahle odumieranie vegetácie. Po takejto udalosti môže byť pôvodná palivová klasifikácia neplatná aj vtedy, ak bola vytvorená len krátko predtým.

Z uvedeného vyplýva, že štruktúru lesného paliva treba chápať ako priestorovo a časovo premenlivý systém. Jej opis musí zahŕňať nielen množstvo paliva, ale aj jeho rozdelenie do vrstiev, hĺbku, objemovú hustotu, horizontálnu a vertikálnu kontinuitu a prítomnosť medzier. Takto vytvorený opis poskytuje východisko pre terénne zisťovanie, diaľkový prieskum Zeme, tvorbu palivových modelov a hodnotenie možného správania požiaru.

1.4. Povrchové, podzemné a korunové palivo

Členenie lesného paliva na podzemné, povrchové a korunové vychádza z jeho polohy v lesnom prostredí. Medzi povrchovou a korunovou vrstvou sa funkčne vyčleňuje rebríkové palivo, ktoré umožňuje prenos horenia do vyšších častí porastu. Takéto členenie je dôležité pri opise palivového komplexu, klasifikácii požiarov, modelovaní ich správania aj pri plánovaní preventívnych opatrení a zásahovej taktiky. Jednotlivé vrstvy sa odlišujú zložením, vlhkovou dynamikou, spôsobom horenia a úlohou, ktorú majú pri vzniku, šírení a dohorievaní požiaru (Keane, 2015; Majlingová et al., 2022).

Hranice medzi palivovými vrstvami nie sú v skutočnom poraste vždy jednoznačné. Čiastočne rozložená hrabanka môže na povrchu horieť plameňom a vo svojej spodnej časti pokračovať žeravením. Vysoké trávy alebo kry sú súčasťou povrchovej vegetácie, pri dostatočnej výške však môžu preniesť požiar k spodným vetvám stromov. Rovnako nemožno každú časť koruny považovať za palivo, ktoré sa pri požiari skutočne spotrebuje. Pre správanie požiaru sú rozhodujúce najmä jemné listy, ihličie a vetvičky, ich vlhkosť a priestorové usporiadanie.

Podzemné palivo tvorí organický materiál uložený v pôdnej organickej vrstve alebo pod povrchom pôdy. Patria sem čiastočne a úplne rozložené rastlinné zvyšky, humusové horizonty, rašelina, korene

a podpovrchové časti pňov. V minerálnych lesných pôdach býva množstvo súvislého podzemného paliva spravidla menšie ako v rašelinových alebo organických pôdach. Jeho význam však môže byť lokálne vysoký, najmä na miestach s hrubou vrstvou surovej organickej hmoty, v okolí pňov, vo vysušených mokradiach a na rašelinových stanovištiach (Rein, 2013; Huang a Rein, 2022).

Horenie podzemného paliva má najčastejšie charakter tlenia alebo žeravenia. Ide o pomalé bezplameňové horenie pevného materiálu, pri ktorom reakcia prebieha na rozhraní paliva a kyslíka. V porovnaní s plameňovým horením dosahuje nižšiu teplotu a postupuje pomalšie, môže však trvať podstatne dlhšie. Pri dostatočne suchej organickej vrstve sa horenie šíri vodorovne aj do hĺbky a spotrebúva materiál, ktorý sa vytváral počas dlhého obdobia (Rein, 2013; Huang a Rein, 2022).

Nebezpečenstvo vzniku podzemného požiaru súvisí najmä s obsahom vody v organickej vrstve, jej hrúbkou, pórovitosťou, obsahom minerálnych prímiesí a dostupnosťou kyslíka. Vlhkosť pôdy a výška hladiny podzemnej vody majú osobitný význam pri rašeline. Ak je organický profil presýtený vodou, zapálenie a ďalšie tlenie sú výrazne obmedzené. Po odvodnení alebo počas dlhotrvajúceho sucha môže obsah vody klesnúť natoľko, že sa rašelina a ďalšie organické materiály stanú schopnými udržať samostatné tlenie.

Podzemný požiar sa môže rozvinúť z povrchového požiaru, ak je horiace alebo žeravé palivo v dostatočne dlhom kontakte so suchou organickou vrstvou. Častým miestom prechodu sú pne, koreňové nábehy, praskliny v pôde a miesta s nahromadenou hrabankou. Opačným smerom sa môže podzemné horenie opätovne preniesť na povrch a zapáliť opad alebo inú suchú vegetáciu. Experimentálne a modelové práce ukazujú, že prechod z tlenia podpovrchovej vrstvy k plameňovému horeniu povrchového opadu závisí od vlhkosti oboch vrstiev, ich kontaktu a dostupnosti kyslíka (Huang et al., 2024).

Podzemné požiare sa ťažko zisťujú a likvidujú. Aktívne ohniská môžu byť prekryté popolom, minerálnou pôdou alebo zdanlivo neporušenou povrchovou vrstvou. Viditeľný dym nemusí spoľahlivo ukazovať ich polohu ani rozsah. Požiar sa môže prostredníctvom koreňov alebo súvislej organickej vrstvy preniesť mimo miesta, na ktorom bol pôvodne pozorovaný. Pri kontrole požiariska preto nestačí posúdiť iba povrch. Potrebne je preveriť teplotu pôdy, pne, koreňové systémy a miesta s hrubšou vrstvou organickej hmoty.

Dlhodobé tlenie môže poškodiť koreňové systémy a pôdne organizmy, zmeniť fyzikálne a chemické vlastnosti pôdy a viesť k úbytku organického horizontu. V rašelinových pôdach môže dôjsť aj k poklesu povrchu a k uvoľneniu značného množstva uhlíka viazaného v organickej hmote. Hoci rašelinové požiare nie sú v podmienkach Slovenska najrozšírenejšou formou požiaru v prírodnom prostredí, ich mechanizmus je významný pri hodnotení lokalít s organickými pôdami, vysušených mokradí a miest s nahromadenou surovou organickou hmotou.

Povrchové palivo zahŕňa horľavý materiál nachádzajúci sa na povrchu pôdy a v nízkej vrstve vegetácie. Patrí sem čerstvý opad, hrabanka, suché ihličie a lístie, trávky, byliny, machy, lišajníky, nízke kry, šišky, kúsky kôry, jemné a hrubšie vetvy, ležiace drevo, ťažbové zvyšky a nízke prirodzené zmladenie, prípadne i sadenice. Presná horná hranica povrchovej vrstvy sa medzi jednotlivými klasifikačnými systémami líši. V metodike terénneho zisťovania preto musí byť jednoznačne určené, ktoré zložky sa ešte zaraďujú do povrchového paliva a ktoré už majú funkciu rebríkového paliva (Anderson, 1982; Scott a Burgan, 2005; Keane, 2015).

Povrchové palivo je rozhodujúce pre vznik väčšiny požiarov v lesnom prostredí. Iniciácia sa najčastejšie uskutočňuje v jemných odumretých častiach, ktoré rýchlo presychajú a na zapálenie potrebujú relatívne malé množstvo energie. Ak ihličie, lístie, tráva alebo drobné vetvičky vytvárajú súvislú vrstvu, po zapálení prenášajú plameň na susedné častice a umožňujú vznik samostatne sa šíiaceho povrchového požiaru (Rothermel, 1972; Nelson, 2001; Matthews, 2014).

V podmienkach Slovenska má jemné povrchové palivo osobitný význam na začiatku jari. Po roztopení snehu zostáva v porastoch a na priľahlých plochách odumretá tráva, opad a minuloročné bylinné zvyšky. Pred vytvorením nového zeleného krytu sú vystavené slnečnému žiareniu a vetru a môžu rýchlo preschnúť. V tomto období je nebezpečenstvo vzniku požiaru spojené predovšetkým s ľudskou činnosťou a s dostupnosťou jemného suchého paliva (Majlingová et al., 2026).

Povrchové palivo nemožno hodnotiť ako jednu homogénnu zložku. Je potrebné rozlišovať jemné palivo, ktoré riadi zapálenie a postup čela požiaru, a hrubšie palivo, ktoré ovplyvňuje najmä trvanie horenia, celkové množstvo uvoľneného tepla a náročnosť dohášania. Dôležitý je aj podiel živej a odumretej vegetácie, výška a hustota palivového lôžka, stupeň rozkladu opadu a kontakt drevných častí s pôdou.

Vlastnosti opadu sa medzi drevinami líšia. Ihličie môže vytvárať voľnejšiu a dobre prevzdušnenú vrstvu, v ktorej sa plameň šíri medzi jemnými časticami. Listový opad sa môže ukladať do širších plôch, pokrývať sa a po zvlhčení zhutňovať. S postupujúcim rozkladom sa mení veľkosť častíc, pórovitosť, schopnosť zadržiavať vodu a spôsob horenia. Pri hodnotení preto nestačí uviesť iba druh opadu; potrebné je poznať aj jeho množstvo, hrúbku, vlhkosť a stav rozkladu.

Bylinné a trávnaté palivo má výraznú sezónnu dynamiku. Zelené rastliny obsahujú viac vody a ich schopnosť podporovať horenie býva spravidla nižšia. Po uschnutí alebo odumretí však môžu vytvoriť vysokú, jemnú a dobre prevzdušnenú vrstvu. Takéto palivo často horí rýchlo a vytvára výrazne naklonené plamene, najmä pri vetre. V presvetlených lesných porastoch, na rúbaniskách, kalamitných plochách a na okrajoch lesa môže trávnatá vrstva riadiť šírenie požiaru viac než samotný stromový opad.

Krovinové palivo sa môže v závislosti od výšky a priestorového usporiadania podieľať na povrchovom aj vertikálnom šírení. Nízke kry sú súčasťou povrchového palivového lôžka. Vyššie a súvislé kroviny môžu vytvárať objemovú vrstvu, v ktorej sa plameň šíri vo väčšej výške nad povrchom a približuje sa k spodným vetvám stromov. Ich funkčné zaradenie preto nemožno určovať iba podľa botanického druhu, ale podľa skutočnej výšky, hustoty a kontaktu s ostatnými palivovými vrstvami.

Ležiace odumreté drevo tvorí významnú časť povrchového paliva najmä v starších, poškodených a kalamitných porastoch. Jemné vetvy a vrcholcové časti sa môžu zapojiť do plameňového frontu pomerne rýchlo. Hrubé kmene a konáre potrebujú dlhšie tepelné pôsobenie, po zapálení však horia alebo žeravejú dlhý čas. Ich poloha nad povrchom, stupeň rozkladu a kontakt s pôdou ovplyvňujú vysušovanie aj prístup kyslíka.

Povrchové palivo sa v priestore mení na krátke vzdialenosti. Rozdiely vznikajú medzi miestami pod korunou a v porastových medzerách, pri kmeňoch, na okraji porastu, pozdĺž ciest a na plochách po ťažbe. Pri mapovaní preto nemožno automaticky predpokladať, že jedna priemerná hodnota množstva paliva vystihuje celý porast. Potrebné je zohľadniť mierku údajov, spôsob výberu terénnych plôch a vnútornú heterogenitu hodnotenej jednotky.

Na modelovanie správania povrchového požiaru sa používajú palivové modely, ktoré vyjadrujú množstvo jednotlivých veľkostných a časových tried, hĺbku palivového lôžka, pomer povrchu k objemu, vlhkosť vyhasnutia a ďalšie vlastnosti. Palivový model nepredstavuje úplný botanický opis porastu. Vyjadruje tú časť palivového komplexu, ktorá za predpokladaných podmienok riadi šírenie povrchového požiaru (Rothermel, 1972; Scott a Burgan, 2005).

Rebríkové palivo predstavuje súbor živých a odumretých palivových prvkov, ktoré vytvárajú vertikálne spojenie medzi povrchovým palivom a hlavnou korunovou vrstvou. Môžu ho tvoriť vysoké trávky, kry, prirodzené zmladenie, mladé a potlačené stromy, výmladky, nízko nasadené živé vetvy, suché spodné vetvy, odumreté stojace stromčeky alebo visiace zvyšky vegetácie (Scott a Reinhardt, 2001; Keane, 2015).

Nejde teda o samostatný druh materiálu, ale o jeho funkciu v priestorovej štruktúre porastu. Tá istá krovina môže byť v nízkom a izolovanom poraste súčasťou povrchového paliva, zatiaľ čo vo vysokom a súvislom podraсте vytvára cestu k spodným vetvám stromov. Pri terénnom hodnotení je preto potrebné zaznamenať nielen prítomnosť podraсту, ale aj jeho výšku, pokrývnosť, hustotu, podiel odumretých častí a vzdialenosť od ďalšej palivovej vrstvy.

Rebríkové palivo umožňuje postupný prenos horenia do vyšších častí porastu. Povrchový požiar najskôr zapáli nižšiu vrstvu, z nej sa oheň prenesie na vyššie kry alebo mladé stromy a následne na spodné časti hlavnej koruny. Takýto postup môže nastať aj vtedy, keď samotné plamene povrchového požiaru nedosahujú priamo ku korunám.

Význam rebríkového paliva nemožno spoľahlivo vyjadriť iba jednou priemernou výškou korunovej bázy. Viedma et al. (2024) ukázali, že vertikálnu štruktúru možno podrobnejšie opísať identifikáciou jednotlivých palivových vrstiev, ich výšky, hĺbky a medzier medzi nimi. Nástroj LadderFuelsR využíva údaje laserového skenovania na automatizovanú analýzu vertikálnej kontinuity a stanovenie výšky korunovej bázy na úrovni jednotlivých stromov. Takýto prístup lepšie zachytáva viacvrstvové porasty, v ktorých môže byť priemerná hodnota zavádzajúca (Viedma et al., 2024).

Význam vertikálnej štruktúry potvrdila aj analýza požiarov v Kalifornii, pri ktorej ukazovatele rebríkového paliva odvodené z laserového skenovania lepšie vysvetľovali závažnosť poškodenia než samotný objem korunovej vrstvy. Výsledok poukazuje na to, že rozloženie paliva medzi povrchom a korunami môže byť pre priebeh požiaru významnejšie než celková korunová biomasa (Hakkenberg et al. 2024).

Odstránenie rebríkového paliva patrí medzi základné preventívne zásahy na obmedzenie prechodu požiaru do korún. Samotná redukcia podraсту však nemusí byť dostatočná, ak na povrchu zostane veľké množstvo jemných ťažbových zvyškov. Tie môžu zvýšiť intenzitu povrchového požiaru a čiastočne znížiť účinok vytvorenej vertikálnej medzery. Opatrenia preto musia súčasne riešiť povrchové palivo, spodné vegetačné vrstvy a podľa potreby aj štruktúru korunového paliva.

Korunové palivo tvoria živé a odumreté časti nachádzajúce sa v korunách stromov. Z hľadiska aktívneho horenia sú najvýznamnejšie listy alebo ihličie, púčiky, jemné vetvičky a tenké konáre. Hrubšie konáre a kmene predstavujú väčšiu časť korunovej a stromovej biomasy, počas prechodu čela korunového požiaru sa však spravidla nepotrebnú v rovnakom rozsahu ako jemné časti.

Množstvo korunového paliva nemožno stotožňovať s celkovou biomasou koruny. Pri modelovaní sa používa pojem dostupné korunové palivo, ktorý zahŕňa najmä jemné časti schopné zapojiť sa

do aktívneho plameňového horenia. Jeho presné vymedzenie závisí od použitého modelu a od hraničného priemeru vetvičiek zahrnutých do výpočtu.

Korunové palivo sa opisuje viacerými ukazovateľmi. Patrí medzi ne výška porastu, výška bázy koruny, hĺbka korunovej vrstvy, zápoj alebo korunová pokryvnosť, plošná množstvo korunového paliva a objemová hustota korunového paliva. Jednotlivé charakteristiky zachytávajú rozdielne vlastnosti a nemožno ich navzájom zamieňať.

Výška bázy koruny vyjadruje zvislú vzdialenosť medzi povrchom a najnižšou časťou súvislej korunovej vrstvy schopnej podporovať vertikálny prenos horenia. Nejde nevyhnutne o výšku najnižšej živej vetvy. Izolované vetvy nemusia vytvárať súvislé palivo, zatiaľ čo kry a mladé stromy môžu skutočnú funkčnú výšku bázy znížiť.

Výška korunovej bázy sa tradične stanovuje z terénnych meraní jednotlivých stromov alebo sa odvodzuje z priemerných porastových charakteristík. V heterogénnych a viacvrstvových porastoch môže byť priemerná hodnota málo reprezentatívna. Súčasné lidarové metódy umožňujú analyzovať vertikálne profily vegetácie a identifikovať jednotlivé palivové vrstvy aj medzery medzi nimi, ich použitie však vyžaduje dostatočnú hustotu bodov a terénne overenie (Viedma et al., 2024).

Objemová hustota korunového paliva vyjadruje suchú hmotnosť dostupného jemného korunového paliva na jednotku objemu korunovej vrstvy (3):

$$CBD = \frac{m_f}{V_c} \quad (3)$$

kde:

CBD – objemová hustota korunového paliva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

m_f – suchá hmotnosť dostupného jemného korunového paliva (kg)

V_c – objem korunovej vrstvy (m^3)

Hodnota sa zvyčajne neodvodzuje priamym odberom celej korunovej vrstvy. Využívajú sa alometrické vzťahy, údaje o stromoch a poraste, vertikálne profily vegetácie a priestorové modely. Výsledok závisí od spôsobu výpočtu objemu koruny, definície dostupného paliva a priestorovej jednotky, na ktorú sa údaj vzťahuje.

Korunová pokryvnosť alebo zápoj vyjadrujú plošné prekrytie územia korunami, nie množstvo paliva v ich objeme. Porast s vysokým zápojom môže mať rozdielne množstvo jemného korunového paliva podľa druhu dreviny, veku, zdravotného stavu a hustoty vetvenia. Rovnako nižší zápoj nevylučuje miestne skupiny stromov s vysokou objemovou hustotou korún. Pri modelovaní preto nemožno korunovú pokryvnosť používať ako priamu náhradu objemovej hustoty korunového paliva.

Samotná prítomnosť korunového paliva nestačí na vznik korunového požiaru. Najskôr musí dôjsť k zapáleniu korún pôsobením povrchového alebo rebríkového požiaru, prípadne dopadom žeravých častíc. Prechod povrchového požiaru do korún závisí najmä od intenzity povrchového horenia, funkčnej výšky korunovej bázy a vlhkosti jemného korunového paliva (Van Wagner, 1977; Scott a Reinhardt, 2001; Cruz et al., 2004).

Van Wagner (1977) vyjadril kritickú intenzitu povrchového požiaru potrebnú na iniciáciu horenia korún vo vzťahu k výške korunovej bázy a teplu potrebnému na zapálenie jemného korunového paliva (4):

$$I_0 = [0.01 \cdot CBH \cdot (460 + 25.9 \cdot FMC)]^{3/2} \quad (4)$$

kde:

I_0 – kritická intenzita povrchového požiaru potrebná na zapálenie korunového paliva ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$)

CBH – výška korunovej bázy (m)

FMC – vlhkosť jemného korunového paliva (%)

Vzťah ukazuje, že s rastúcou výškou korunovej bázy a vlhkosťou korunového paliva rastie intenzita povrchového požiaru potrebná na iniciáciu korún. Ide však o zjednodušený model. Skutočný prechod ovplyvňuje aj prítomnosť rebríkového paliva, priestorová heterogenita, vietor, dĺžka plameňa a miestne nahromadenie paliva.

Po iniciácii požiaru v korune stromu sa požiar nemusí automaticky šíriť súvislo korunovou vrstvou. Môže dôjsť iba k vzplanutiu jednotlivého stromu alebo skupiny stromov. Udržanie aktívneho korunového požiaru vyžaduje dostatočnú horizontálnu kontinuitu a objemovú hustotu jemného korunového paliva, ako aj priaznivé veterné a vlhkosťné podmienky (Van Wagner, 1977; Cruz et al., 2004).

Korunové palivo sa mení počas vývoja porastu aj po disturbanciách. V mladých hustých porastoch sú koruny často nízko nasadené a vertikálne prepojené. V starších zapojených porastoch môže prirodzené vyvetvovanie výšku korunovej bázy zvýšiť, ale súvislý podrast môže túto medzeru opäť vyplniť. Po odumretí stromov môže jemné suché palivo určitý čas zostať v korunách a neskôr opadať na povrch. Požiarne podmienky sa preto po disturbancii menia a nemožno ich opísať jediným nemenným stavom.

Podzemné, povrchové, rebríkové a korunové palivo nemožno hodnotiť izolovane. V reálnom požiari môže horenie súčasne prebiehať vo viacerých vrstvách alebo sa medzi nimi postupne prenášať. Povrchový požiar môže zapáliť hrubé drevné zvyšky, preniknúť do suchej organickej pôdnej vrstvy alebo sa cez kry a mladé stromy preniesť do korún. Korunový požiar spätne zvyšuje tepelnú záťaž povrchu a vytvára horiace a žeravé častice, ktoré môžu zakladať nové ohniská.

Jednotlivé vrstvy však nemajú rovnaký význam pri nebezpečenstve vzniku požiaru. Iniciácia sa najčastejšie uskutočňuje v jemnom povrchovom palive. Podzemné palivo sa obvyčajne zapája až po dlhšom tepelnom pôsobení, hoci na veľmi suchých organických pôdach môže byť zapálené aj priamo. Rebríkové a korunové palivo ovplyvňuje predovšetkým ďalší vertikálny rozvoj požiaru, nie pravdepodobnosť jeho prvotného vzniku pri povrchu.

Pri hodnotení rizika vzniku požiaru treba preto osobitne posudzovať prítomnosť a stav iniciačne významného jemného paliva. Pri hodnotení možného správania už vzniknutého požiaru je potrebné doplniť množstvo hrubého paliva, vertikálne prepojenie vegetácie, výšku korunovej bázy, objemovú hustotu a horizontálnu kontinuitu korunového paliva. Spojenie týchto údajov poskytuje úplnejší obraz než hodnotenie ktorejkoľvek vrstvy samostatne.

Pre metodiku mapovania z toho vyplýva potreba vytvárať oddelené, ale vzájomne prepojitelné údaje o povrchovom, rebríkovom a korunovom palive. Podzemné palivo treba zaradiť na lokality, na ktorých sa nachádza dostatočne hrubá organická vrstva alebo iný materiál schopný dlhodobého tlenia. Každá vrstva vyžaduje odlišné vstupné údaje, spôsob terénneho overenia a interval aktualizácie.

1.5. Živé a odumreté palivo v lesnom prostredí

Rozlíšenie živého a odumretého paliva patrí medzi základné členenia palivového komplexu. Vychádza z fyziologického stavu rastlinného materiálu a súvisí najmä so spôsobom príjmu, zadržiavania a straty vody. Živé palivo tvorí fyziologicky aktívna vegetácia, predovšetkým listy, ihličie, živé vetvičky, byliny, tráv, kry, prirodzené zmladenie alebo sadenice drevín a jemné časti korún stromov. Odumreté palivo predstavuje organický materiál, v ktorom už neprebíha fyziologická regulácia vody. Patria sem suché lístie a ihličie, odumreté bylinné zvyšky, suché vetvy, opad, hrabanka, pne, ležiace drevo a ťažbové zvyšky (Scott a Burgan, 2005; Keane, 2015).

Rozdelenie paliva na živé a odumreté neznamena, že živé palivo je nehorľavé a odumreté palivo je vždy pripravené na zapálenie. O ich skutočnom zapojení do horenia rozhoduje obsah vody, veľkosť a tvar častíc, chemické zloženie, intenzita tepelného pôsobenia a priestorové usporiadanie. Živé palivo môže pri dlhodobom vodnom strese výrazne strácať vodu a jeho zapáliteľnosť sa zvyšuje. Odumreté palivo môže byť po daždi alebo pri vysokej relatívnej vlhkosti natoľko vlhké, že sa od slabého iniciačného zdroja nezapáli.

Vlhkosť živého a odumretého paliva patrí medzi najvýznamnejšie premenné ovplyvňujúce nebezpečenstvo vzniku požiaru a po jeho iniciácii aj rýchlosť šírenia, spotrebu paliva a spôsob horenia. Súčasné modely hodnotenia podmienok vzniku požiaru preto pracujú s vlhkosťou živého a odumretého paliva oddelene. Modernizovaná verzia amerického systému hodnotenia nebezpečenstva vzniku požiaru používa samostatné modely pre štyri veľkostné triedy odumretého paliva a dve kategórie živého paliva. Aktualizované výpočty dosiahli pri testovaní porovnateľnú alebo vyššiu úspešnosť pri identifikácii dní s výskytom požiarov a dní so vznikom veľkých požiarov než predchádzajúca verzia systému (Jolly et al., 2024).

Živé palivo je súčasťou rastliny, ktorá prijíma vodu z pôdy a prostredníctvom fyziologických procesov reguluje jej transport a výpar. Jeho vlhkosť preto nie je iba výsledkom okamžitej teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu. Závisí od druhu rastliny, dostupnosti vody v pôde, vývoja koreňového systému, fenologickej fázy, zdravotného stavu, vodného potenciálu a dĺžky trvania sucha (Jolly et al., 2015; Rao et al., 2023; McNorton a Di Giuseppe, 2024).

Hrubé živé vetvy a kmene sú súčasťou biomasy stromov, počas prechodu čela požiaru sa však spravidla nezapoja do horenia v rovnakom rozsahu ako jemné časti. Pri hodnotení živého paliva je preto potrebné presne uviesť, ktoré rastlinné orgány boli zahrnuté do odberu alebo do výpočtu.

Obsah vody v živom palive sa počas roka mení. Na začiatku vegetačného obdobia sa pri tvorbe nových listov, ihličia a výhonkov spravidla zvyšuje. Po dozretí vegetácie môže postupne klesať. Výraznejší pokles nastáva počas sucha, keď príjem vody koreňmi nestačí pokrývať jej stratu transpiráciou a rastlina obmedzuje fyziologickú aktivitu. Priebeh zmien sa medzi druhmi líši a rovnaké meteorologické podmienky preto nemusia viesť k rovnakej vlhkosti jednotlivých druhov paliva.

Súčasné výskumy potvrdzujú, že nízka vlhkosť živého paliva môže zvyšovať pravdepodobnosť úspešnej iniciácie požiaru. Rao et al. (2023) preukázali súvislosť medzi suchým živým palivom a vyššou pravdepodobnosťou požiarov spôsobených bleskom. Výsledky ukázali, že živá vegetácia nie je iba pasívnou zložkou, ktorá sa zapája až pri rozvinutom požiari, ale pri dostatočne nízkom obsahu vody môže ovplyvniť aj úspešnosť počiatočného zapálenia.

Laboratórne skúšky súčasne ukazujú, že pokles obsahu vody v živom palive skracuje čas potrebný na zapálenie a zvyšuje pravdepodobnosť, že palivo zapáli dopadajúca žeravá častica. Vlhkosť však nie je jedinou rozhodujúcou vlastnosťou. Výsledok ovplyvňuje aj druh rastliny, tvar a hustota palivového lôžka, množstvo jemných častí a energia iniciačného zdroja. Preto nemožno pre všetky druhy živého paliva používať jednu univerzálnu kritickú hodnotu vlhkosti (Santoso et al., 2024).

Živé palivo sa od odumretého paliva líši aj chemickým zložením. Obsahuje rôzne množstvo živíc, terpénov, silíc, voskov, tukov, cukrov a ďalších extraktívnych látok. Niektoré z nich sa pri zahrievaní uvoľňujú ako horľavé prchavé produkty a môžu ovplyvniť čas zapálenia, priebeh plameňového horenia a množstvo uvoľneného tepla. Druhy s vyšším obsahom prchavých organických látok preto môžu horieť intenzívne aj pri obsahu vody, pri ktorom by iný rastlinný materiál vykazoval nižšiu zapáliteľnosť.

Vlhkosť živého paliva sa často vyjadruje ako pomer hmotnosti vody k suchej hmotnosti materiálu (5):

$$M_l = \frac{m_f - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (5)$$

kde:

M_l – vlhkosť živého paliva (%)

m_f – hmotnosť čerstvej vzorky (g)

m_d – hmotnosť vzorky po vysušení do konštantnej hmotnosti (g).

Pri takto definovanej vlhkosti môže hodnota presiahnuť 100 %, pretože hmotnosť vody môže byť väčšia než suchá hmotnosť vzorky. Tento spôsob vyjadrenia sa používa v požiarnom výskume a pri modelovaní správania požiaru. Pri každom údaji však musí byť uvedené, či sa vlhkosť vzťahuje na suchú alebo mokrú hmotnostnú bázu, pretože výsledné percentá nie sú medzi oboma spôsobmi priamo porovnateľné.

Presné stanovenie vlhkosti živého paliva vyžaduje reprezentatívny odber. Vzorky treba odoberať z rovnakej časti rastliny, v porovnateľnej výške a expozícii a približne v rovnakom dennom čase. Obsah vody sa môže meniť aj počas dňa v závislosti od transpiračnej aktivity a meteorologických podmienok. Výskum živého a odumretého vresoviskového paliva potvrdil merateľné denné zmeny vlhkosti, pričom odumreté časti reagovali výraznejšie na počasie a živé časti si zachovávali odlišnú dynamiku podmienenú fyziologickou reguláciou (Davies et al., 2024).

Odobratá vzorka musí byť bezprostredne po odbere uzavretá tak, aby nedochádzalo k strate vody počas prepravy. Čerstvá hmotnosť sa má stanoviť čo najskôr. Následné sušenie musí pokračovať do dosiahnutia konštantnej hmotnosti pri definovanej teplote. Pri porovnávaní výsledkov je potrebné zachovať rovnaký spôsob odberu, prípravy a sušenia, pretože rozdielne postupy môžu viesť k systematicky odlišným hodnotám.

Priestorové hodnotenie vlhkosti živého paliva nemožno založiť iba na obmedzenom počte terénnych odberov. V súčasnosti sa preto využívajú modely prepájajúce terénne údaje s meteorologickými, pôdnymi a diaľkovo snímanými ukazovateľmi. Globálna databáza Globe-LFMC 2.0 zhromažďuje a harmonizuje terénne merania vlhkosti živého paliva a poskytuje referenčný základ na vývoj a overovanie priestorových modelov (Yebra et al., 2024).

Družicové odhady vychádzajú z reakcie spektrálneho signálu na obsah vody, štruktúru vegetácie a podiel zelenej a suchej biomasy. Ich presnosť však závisí od typu vegetácie, priestorového rozlíšenia snímok,

oblačnosti, sezónnej zmeny pokrývnosti a kvality terénnej kalibrácie. Model vytvorený pre určitý druh alebo región nemožno bez overenia automaticky preniesť do iných podmienok. Výskum z roku 2024 potvrdil, že prenositeľnosť empirických modelov vlhkosti živého paliva medzi regiónmi môže byť obmedzená a vyžaduje miestnu kalibráciu a časové overenie (Marino et al., 2024).

Odumreté palivo nie je fyziologicky spojené s koreňovým systémom a jeho obsah vody sa mení predovšetkým výmenou vodnej pary a kvapalnej vody s okolím. Vlhkosť ovplyvňuje relatívna vlhkosť a teplota vzduchu, zrážky, rosa, slnečné žiarenie, vietor, kontakt s pôdou, zatienenie a veľkosť palivovej častice. Materiál sa postupne približuje k rovnovážnej vlhkosti zodpovedajúcej aktuálnym podmienkam prostredia, túto rovnováhu však v reálnych podmienkach často nedosiahne, pretože počasie sa neustále mení (Nelson, 2001; Matthews, 2014; Perello et al., 2024).

Jemné odumreté palivo reaguje na zmeny prostredia rýchlo. Suché ihličie, lístie, tráva a drobné vetvičky môžu po daždi opäť preschnúť počas niekoľkých hodín, najmä ak sú vystavené slnečnému žiareniu a vetru. V zapojenom poraste býva ich vysušovanie pomalšie v dôsledku zatienenia, vyššej relatívnej vlhkosti a slabšieho prúdenia vzduchu. Aj v rámci jedného porastu preto môžu v rovnakom čase existovať výrazné rozdiely medzi okrajom, porastovou medzerou a vnútrom porastu.

Pri odumretom palive sa používa rovnaký základný výpočet vlhkosti na suchú hmotnostnú bázu (6):

$$M_D = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (6)$$

kde:

M_D – vlhkosť odumretého paliva (%)

m_w – hmotnosť vlhkej vzorky (g)

m_d – hmotnosť vzorky po vysušení do konštantnej hmotnosti (g)

Pri laboratórnom stanovení treba uviesť teplotu sušenia, dĺžku sušenia alebo kritérium konštantnej hmotnosti, presnosť váženía a spôsob uchovania vzorky medzi odberom a vážením. Tieto podmienky majú osobitný význam pri jemnom palive, ktoré môže počas manipulácie rýchlo strácať alebo prijímať vodu.

Odumreté drevné palivo sa v modeloch tradične člení podľa časovej odozvy vlhkosti do tried 1 h, 10 h, 100 h a 1 000 h. Časové označenie nevyjadruje presný čas úplného vysušenia ani dobu horenia. Predstavuje modelový čas, za ktorý sa rozdiel medzi aktuálnou vlhkosťou paliva a rovnovážnou vlhkosťou za stálych podmienok zmenší približne o 63 %. Triedy sú naviazané na približné rozmery palivových častíc a umožňujú rozlíšiť rýchlo a pomaly reagujúce palivo (Fosberg, 1970; Bradshaw et al., 1984; Jolly et al., 2024).

Jednohodinové palivo zahŕňa najjemnejšie odumreté časti, spravidla s priemerom do približne 6 mm. Patria sem suché ihličie, lístie, trávy a drobné vetvičky. Táto trieda má najväčší význam pri posudzovaní krátkodobej zmeny nebezpečenstva vzniku požiaru, pretože reaguje na počasie v priebehu hodín.

Desaťhodinové palivo tvoria vetvičky a malé drevné časti s väčším priemerom. Ich vlhkosť sa mení pomalšie, ale stále reaguje na denný priebeh počasia. V praxi sa na reprezentáciu tejto triedy používajú štandardizované drevené palivové tyčinky, ktorých hmotnosť sa priebežne sleduje a prepočítava

na obsah vody. Súčasné reanalýzy vlhkosti odumretého paliva využívajú takéto merania na kalibráciu modelov a priestorových údajových súborov (Coen et al., 2024).

Stohodinové palivo zahŕňa stredne hrubé drevné časti. Jeho vlhkosť odráža viacdenný priebeh počasia a na krátkodobú zmenu relatívnej vlhkosti reaguje pomalšie. Tisíchodinové palivo predstavujú hrubšie konáre a kmene. Ich vnútorný obsah vody sa mení počas dlhšieho obdobia a výraznejšie preschnutie nastáva najmä pri dlhotrvajúcom suchu.

Časové triedy sú zjednodušením. Skutočná rýchlosť vysušovania závisí aj od druhu dreva, hustoty, prítomnosti kôry, stupňa rozkladu, polohy nad povrchom a kontaktu s pôdou. Rozložené drevo môže prijímať a zadržiavať vodu inak než čerstvo odumretý materiál rovnakého priemeru. Časti ležiace priamo na vlhkej pôde majú odlišný režim než zavesené alebo vyvýšené konáre.

Súčasné modely vlhkosti odumretého paliva preto čoraz viac zohľadňujú konkrétny druh paliva a rozdielne časové mierky. Perello et al. (2024) vytvorili prispôsobiteľný model, ktorý možno kalibrovať pre rôzne typy odumretého paliva a časové rozlíšenie. Takýto prístup je vhodnejší než použitie jednej univerzálnej rovnice bez miestneho overenia.

Globálne porovnanie modelov vlhkosti jednohodinového paliva ukázalo, že modely využívajúce deficit tlaku vodnej pary poskytovali v rozsiahlej databáze najlepšie odhady. Najväčšia neistota však zostala pri vlhkosti nižšej než 10 %, teda práve v rozsahu, ktorý má zásadný význam pre zapálenie a rýchle šírenie požiaru. To potvrdzuje potrebu miestnych meraní a overovania modelov počas veľmi suchých období (Nolan et al., 2024).

Vlhkosť odumretého paliva pod korunovou vrstvou sa môže výrazne líšiť od podmienok meraných na otvorenej meteorologickej stanici. Koruny menia množstvo dopadajúcich zrážok, slnečné žiarenie, vietor, teplotu aj relatívnu vlhkosť pri povrchu. Nové predpovedné systémy preto spájajú automatizované snímače paliva umiestnené pod porastom, mriežkové predpovede počasia a charakteristiky krajiny. Takýto postup umožňuje predpovedať dennú minimálnu vlhkosť desaťhodinového paliva s predstihom niekoľkých dní (Schunk et al., 2024).

Základný rozdiel medzi živým a odumretým palivom spočíva v mechanizme regulácie vody. Odumreté palivo je bezprostredne viazané na atmosférické podmienky a zrážky. Živé palivo je ovplyvnené aj príjmom vody z pôdy, stavom koreňového systému a fyziologickou reakciou rastliny. Vlhkosť živého paliva preto nemožno spoľahlivo odvodiť iba z relatívnej vlhkosti vzduchu alebo z krátkodobého úhrnu zrážok.

Rozdiely sa prejavujú aj počas dňa. Odumreté jemné palivo môže rýchlo strácať vodu po východe slnka a opätovne ju prijímať v noci. Živá vegetácia reaguje prostredníctvom otvárania a zatvárania prieduchov, zmeny transpiračného toku a čerpania vody z hlbších pôdných vrstiev. Pri intenzívnom alebo dlhodobom suchu sa však regulačná schopnosť rastliny znižuje.

Davies et al. (2024) pri spoločnom meraní živých a odumretých častí vresu zaznamenali rozdielnú dennú dynamiku. Odumreté palivo bolo výraznejšie ovplyvnené okamžitým počasím, zatiaľ čo živé palivo si zachovávalo vyšší obsah vody a odlišný denný priebeh. Výsledok potvrdzuje, že pri modelovaní nemožno jednu kategóriu nahrádzať druhou ani používať rovnaký algoritmus bez kalibrácie.

Na priestorovej úrovni sú významné pôdna vlhkosť, vegetačný vodný obsah a atmosférická suchosť. Ich vzájomné pôsobenie ovplyvňuje rast vegetácie, tvorbu paliva, jeho vysušovanie a úspešnosť iniciácie. Alizadeh et al. (2024) ukázali, že pôdna vlhkosť a vegetačný vodný obsah vytvárajú časovo posunuté väzby medzi tvorbou paliva, resp. množstvom paliva, a neskoršími podmienkami vzniku požiaru. Vlhšie obdobie môže podporiť rast biomasy, ktorá sa po následnom vysušení stáva dostupným palivom.

Pri vzniku požiaru má v lesnom prostredí najčastejšie rozhodujúcu úlohu jemné odumreté palivo. Vzhľadom na nízku tepelnú zotrvačnosť sa rýchlo zohrieva a pri nízkej vlhkosti sa môže zapáliť od iskry, plameňa alebo žeravej častice. Ak je priestorovo súvislé, po iniciácii prenesie oheň na ďalšie palivové prvky.

Riziko vzniku požiaru však nie je určené iba prítomnosťou odumretého paliva. V krovinových, trávnatých a riedkych lesných porastoch môže živá vegetácia tvoriť podstatnú časť množstva paliva. Pri nízkej vlhkosti môže podporovať udržanie plameňa a jeho prenos. V niektorých ekosystémoch môže byť stav živého paliva lepším ukazovateľom podmienok vzniku požiaru než samotné meteorologické indexy.

Vzájomný podiel živého a odumretého paliva sa mení sezónne. Na jar môže byť rozhodujúca minuloročná odumretá vegetácia. Počas rastu novej vegetácie narastá podiel živého paliva s vysokým obsahom vody. V období dozrievania a sucha sa časť bylín a tráv mení na odumreté palivo, pričom súčasne môže klesať vlhkosť zostávajúcich živých častí. Palivové modely s dynamickým bylinným palivom preto umožňujú presúvať časť paliva medzi živou a odumretou kategóriou podľa aktuálneho obsahu vody (Scott a Burgan, 2005; Jolly et al., 2024).

Pri hodnotení nebezpečenstva vzniku požiaru treba rozlišovať najmenej tri situácie. Prvou je krátkodobé preschnutie jemného odumretého paliva po niekoľkých hodinách alebo dňoch suchého počasia. Druhou je dlhšie trvajúce sucho, pri ktorom sa znižuje vlhkosť hrubších palivových frakcií a podpovrchových organických vrstiev. Tretou je fyziologické sucho živej vegetácie, keď klesá obsah vody v listoch, ihličí a jemných vetvách. Každá situácia vyžaduje iné údaje a nemá sa vyjadrovať jedným spoločným ukazovateľom.

Po iniciácii požiaru ovplyvňuje vlhkosť živého a odumretého paliva množstvo energie potrebnej na jeho vysušenie, rýchlosť uvoľňovania prchavých produktov a podiel paliva, ktorý sa skutočne spotrebuje. Vyššia vlhkosť znižuje teplotu reakčnej zóny, pretože časť tepla sa spotrebuje na zohrievanie a odparovanie vody. Súčasne môže predlžovať čas do zapálenia a obmedzovať rýchlosť šírenia.

Jemné odumreté palivo riadi najmä postup čela povrchového požiaru. Hrubšie odumreté palivo sa zapája pomalšie a ovplyvňuje celkové tepelné pôsobenie, dĺžku horenia a náročnosť dohášania. Živé bylinné a krovinové palivo môže po vysušení podporovať vysoké plamene a vertikálny prenos do korún. Jemné živé korunové palivo ovplyvňuje iniciáciu a udržanie korunového požiaru.

Obsah vody ovplyvňuje aj pomer plameňového horenia a tlenia a zloženie emisií. Experimentálne výsledky z roku 2024 ukázali, že vlhkosť, prístup kyslíka a tepelný tok menia spôsob horenia ihličia a množstvo produktov nedokonalého spaľovania. Pri hodnotení požiaru preto vlhkosť nemožno chápať iba ako ukazovateľ zapáliteľnosti, ale aj ako premennú ovplyvňujúcu priebeh spaľovania a tvorbu dymu (Rivera et al., 2024).

Živé a odumreté palivo sa musí pri terénnom zisťovaní evidovať oddelene. Pri každej vzorke treba zaznamenať druh alebo typ vegetácie, rastlinný orgán, veľkostnú triedu, polohu v palivovej vrstve, dátum

a čas odberu, meteorologické podmienky a spôsob ďalšieho spracovania. Spoločné váženie živých a odumretých častí by znemožnilo správne určiť ich vlhkosť a funkciu pri požiari.

Pri odumretom palive treba rozlišovať najmenej jemné palivo riadiace iniciáciu a počiatkové šírenie a hrubé palivo ovplyvňujúce dlhšie trvanie horenia. Ak sa používajú časové triedy, musia byť uvedené ich rozmerové hranice a spôsob priradenia. Označenie 1 h, 10 h, 100 h a 1 000 h sa nemá interpretovať ako priamo nameraný čas vysychania konkrétnej vzorky.

Pri živom palive je potrebné vytvoriť odberový plán rešpektujúci fenologický vývoj. Jednorazová hodnota nemôže reprezentovať celý rok. Minimálne treba zachytiť začiatok vegetačného obdobia, obdobie plného vývoja, letné sucho a obdobie dozrievania alebo odumierania bylinného paliva. Pri druhoch s výrazne odlišnou fyziológiou je potrebné viesť samostatné časové rady.

Pri mapovaní nemožno vlhkosť živého a odumretého paliva považovať za trvalý atribút palivovej mapy. Palivová mapa môže obsahovať typ paliva, palivovú množstvo, veľkostné zastúpenie a ďalšie relatívne stabilné charakteristiky. Aktuálna vlhkosť je dynamická premenná, ktorú treba pravidelne aktualizovať z meteorologických, terénnych, senzorových alebo diaľkovo snímaných údajov.

Pre modelovanie rizika vzniku požiaru má najväčší význam aktuálna vlhkosť iniciačne významného paliva. V lesnom prostredí ide spravidla o jemné odumreté povrchové palivo, v niektorých porastoch doplnené o vlhkosť živých tráv, krovín alebo korunovej vegetácie. Pre modelovanie ďalšieho správania požiaru treba doplniť vlhkosť ostatných palivových vrstiev a veľkostných tried.

Vytvorenie spoľahlivej priestorovej vrstvy vlhkosti paliva preto vyžaduje spojenie viacerých zdrojov. Terénne odbery poskytujú referenčné hodnoty, automatické snímače zachytávajú krátkodobú dynamiku, meteorologické údaje umožňujú priebežné modelovanie a diaľkový prieskum Zeme rozširuje hodnotenie na väčšie územie. Žiadny z týchto zdrojov však nemožno používať bez kontroly jeho priestorovej a časovej reprezentatívnosti.

Rozdelenie na živé a odumreté palivo má význam v celom metodickom systéme monografie. Ovplyvňuje spôsob terénneho odberu, laboratórne stanovenie vlhkosti a požiarnych vlastností paliva, tvorbu databázy, výber palivového modelu aj hodnotenie nebezpečenstva a rizika vzniku požiaru. Zmiešanie oboch kategórií by viedlo k strate informácie o ich rozdielnej vlhkostnej odozve a o ich odlišnej úlohe pri iniciácii a ďalšom priebehu požiaru.

1.6. Horizontálna a vertikálna kontinuita paliva

Kontinuita paliva vyjadruje mieru priestorovej spojitosti horľavého materiálu a jeho schopnosť umožniť prenos horenia medzi susednými palivovými prvkami alebo medzi jednotlivými vrstvami porastu. Horizontálna kontinuita sa vzťahuje na spojitosť paliva v plošnom smere, zatiaľ čo vertikálna kontinuita vyjadruje prepojenie palivových vrstiev od povrchu pôdy cez bylinnú a krovinovú vegetáciu až ku korunám stromov. Obe formy kontinuity ovplyvňujú predovšetkým správanie požiaru po jeho vzniku, najmä rýchlosť a smer šírenia, intenzitu horenia a možnosť prechodu povrchového požiaru do korunovej vrstvy (Rothermel, 1972; Scott a Reinhardt, 2001; Keane, 2015; Viedma et al., 2024).

Pri hodnotení nebezpečenstva a rizika vzniku požiaru má kontinuita význam najmä v súvislosti s jemným palivom v bezprostrednom okolí iniciačného zdroja. Izolovaná palivová častica sa môže zapáliť, ale ak nie je v kontakte s ďalším vhodným palivom alebo mu nedokáže odovzdať dostatočné množstvo

tepla, počiatočné horenie zanikne. Súvislá vrstva suchého opadu, trávy, ihličia alebo jemných vetvičiek naopak umožňuje, aby sa horenie prenieslo na susedné častice a vytvorilo samostatne sa šíriaci požiar. Kontinuita paliva preto spája proces iniciácie s následným rozvojom požiaru, nemožno ju však stotožňovať so samotnou pravdepodobnosťou jeho vzniku.

Palivová kontinuita nie je iba priestorovou vlastnosťou. Rovnaká vzdialenosť medzi palivovými časticami môže mať rozdielny význam podľa ich vlhkosti, rozmerov, orientácie, požiarnych vlastností a intenzity tepelného pôsobenia. Medzera, ktorá preruší slabý povrchový požiar, nemusí byť účinná pri vysokých plameňoch, silnom vetre alebo prenose žeravých častíc. Funkčnú kontinuitu preto treba posudzovať vo vzťahu k vlastnostiam paliva a k predpokladanému správaniu požiaru, nie iba podľa toho, či sa vegetačný kry na mape javí ako súvislý.

Horizontálna kontinuita povrchového paliva vyjadruje mieru, v akej na seba palivové častice nadväzujú na povrchu pôdy a umožňujú prenos plameňa v plošnom smere. Vysokú kontinuitu môže vytvárať súvislá vrstva suchého ihličia, lístia, tráv, bylinných zvyškov, nízkych krovín alebo jemných ťažbových zvyškov. Ak je palivo dostatočne suché a primerane prevzdušnené, požiar sa môže šíriť aj pri relatívne nízkom plošnom množstve paliva (Rothermel, 1972; Anderson, 1982; Scott a Burgan, 2005).

Horizontálna kontinuita sa znižuje prítomnosťou medzier, v ktorých palivo chýba, je málo zastúpené alebo má vysokú vlhkosť. Prírodné prerušenia môžu vytvárať vodné toky, skalné plochy, sutiny, vlhké depresie, plochy s riedkou vegetáciou alebo miesta s odkrytou minerálnou pôdou. Medzi umelé prerušenia patria lesné cesty, približovacie linky, protipožiarne pásy, obrábané poľnohospodárske plochy a územia, na ktorých bola cielene redukované množstvo paliva.

Prítomnosť prerušenia sama osebe nezaručuje zastavenie požiaru. Jeho účinnosť závisí od šírky, orientácie voči smeru šírenia, druhu paliva na oboch stranách, sklonu terénu, rýchlosti vetra a intenzity požiaru. Úzky pás bez povrchového paliva môže zastaviť pomaly sa šíriaci požiar s krátkymi plameňmi, nemusí však zabrániť prenosu sálaním, prúdením horúcich plynov alebo dopadom žeravých častíc pri intenzívnejšom požiari.

Horizontálna kontinuita sa môže výrazne meniť aj v rámci jedného porastu. Pod korunami stromov môže byť povrch pokrytý súvislou vrstvou opadu, zatiaľ čo v porastových medzerách môže prevládať tráva alebo bylinná vegetácia. V okolí kmeňov, pri koreňových nábehoch a na miestach s ležiacim drevom sa palivo môže lokálne hromadiť. Naopak, pozdĺž chodníkov, približovacích liniek alebo na zamokrených miestach môže byť kontinuita prerušená.

Pri listovom opade sa súvislosť palivového lôžka mení podľa tvaru listov, ich vrstvenia, stupňa rozkladu a pôsobenia vetra. Široké listy môžu vytvárať prekrývajúcu sa vrstvu, ktorá sa po zvlhčení zhutňuje. Ihličie často vytvára pórovitejšie lôžko s väčším množstvom vzduchových medzier. Rozdielna fyzická štruktúra ovplyvňuje prenos plameňa aj pri porovnateľnej suchej hmotnosti paliva.

Trávnaté palivo vytvára vysokú horizontálnu kontinuitu vtedy, keď sú steblá rozmiestnené rovnomerne a ich vzdialenosť umožňuje prenos plameňa. Zelené a vlhké časti môžu kontinuitu horenia obmedzovať, po odumretí alebo vysušení však vzniká jemná, súvislá a dobre prevzdušnená vrstva. V presvetlených porastoch, na rúbaniskách a kalamitných plochách môže byť práve trávnatá vrstva hlavným dôvodom rýchleho povrchového šírenia.

Krovinové palivo vytvára horizontálnu kontinuitu vo väčšom výškovom rozsahu. Rozhodujúca nie je iba plošná pokryvnosť krovín, ale aj vzdialenosť medzi jednotlivými krikmi, prekryvanie ich korún a množstvo jemných živých a odumretých častí. Súvislý krovinový porast môže podporovať tvorbu vyšších plameňov a výraznejšie tepelné pôsobenie než nízka povrchová vrstva.

Pri ležiacom dreve nemožno kontinuitu posudzovať iba podľa počtu alebo objemu kusov. Hrubé kmene môžu byť uložené blízko seba, ale ak medzi nimi chýba jemné palivo, nemusia vytvárať súvislú cestu pre rýchly postup čela požiaru. Jemné vetvy, odlupujúca sa kôra, suché ihličie a bylenná vegetácia medzi kmeňmi môžu naopak prepájať hrubé palivo a umožniť jeho postupné zapájanie do horenia.

Horizontálna kontinuita korunového paliva vyjadruje priestorové prepojenie jemných horľavých častí v korunovej vrstve. Závisí od vzdialenosti medzi korunami, ich tvaru a rozmerov, zápoja, korunovej pokryvnosti, objemovej hustoty jemného korunového paliva a skupinového usporiadania stromov.

Korunová pokryvnosť alebo zápoj poskytujú základnú informáciu o plošnom prekrytí územia korunami, nevystihujú však úplne funkčnú kontinuitu. Dve plochy s rovnakou korunovou pokryvnosťou môžu mať odlišné rozmiestnenie stromov. V jednom prípade môžu koruny vytvárať súvislú vrstvu, v druhom môžu byť rovnaké plochy sústredené do oddelených skupín s väčšími medzerami medzi nimi. Rozdiely v priestorovom usporiadaní ovplyvňujú prenos tepla a schopnosť požiaru pokračovať korunovou vrstvou.

Modelové výsledky potvrdzujú, že horizontálna kontinuita korún významne ovplyvňuje nielen šírenie požiaru medzi stromami, ale aj vertikálne zapájanie korunového paliva a podiel paliva, ktorý sa počas požiaru spotrebuje. Menšie rozostupy a vyššia koncentrácia jemného korunového paliva uľahčujú prenos tepla medzi susednými korunami. Pri väčších medzerách sa zvyšuje ochladzovanie prúdením vzduchu a môže dôjsť iba k vzplanutiu jednotlivých stromov alebo skupín stromov bez vytvorenia súvislého aktívneho korunového požiaru (Parsons et al., 2023).

Pri hodnotení horizontálnej kontinuity korún je potrebné rozlišovať medzi nominálnou vzdialenosťou kmeňov a skutočnou vzdialenosťou jemných korunových častí. Stromy môžu mať kmene od seba pomerne ďaleko, ale rozložené koruny sa môžu dotýkať alebo prekryvať. Naopak, štíhle alebo nepravidelné koruny môžu vytvárať medzery aj pri menšom rozstupe kmeňov.

Kontinuita korunového paliva je významná najmä po zapálení korún. Samotný hustý zápoj alebo súvislé koruny neznameniajú vysoké riziko vzniku požiaru pri povrchu. Ovplyvňujú predovšetkým možnosť, že sa už iniciovaný korunový požiar udrží a bude sa šíriť medzi stromami. Pri hodnotení rizika vzniku požiaru je potrebné osobitne analyzovať iniciačne významné povrchové palivo a zdroje iniciácie.

Vertikálna kontinuita vyjadruje prepojenie palivových prvkov medzi povrchom pôdy a korunovou vrstvou. Vysoká vertikálna kontinuita vzniká vtedy, keď sú jednotlivé vrstvy umiestnené dostatočne blízko a vytvárajú postupnú cestu pre prenos plameňa a tepla. Môžu ju tvoriť vysoké trávy, kry, prirodzené zmladenie, mladé a potlačené stromy, suché spodné vetvy, visiace odumreté konáre a nízko nasadené živé koruny.

Vertikálna kontinuita je funkčne spojená s rebríkovým palivom. Nejde však iba o prítomnosť jednej vrstvy podrastu. Rozhodujúci je celý profil vegetácie vrátane výšky jednotlivých vrstiev, ich hĺbky, objemovej hustoty a medzier medzi nimi. Ak sú medzery malé, horenie môže postupovať po jednotlivých stupňoch od povrchu ku korunám. Ak je medzi povrchovou a korunovou vrstvou dostatočne veľký priestor bez horľavého materiálu, prenos je obmedzený a vyžaduje vyššiu intenzitu povrchového požiaru.

Výška korunovej bázy sa často používa ako zjednodušený ukazovateľ vertikálnej kontinuity. Vyjadruje vzdialenosť od povrchu k spodnej hranici súvislej korunovej vrstvy. Pri viacvrstvových porastoch však jedna priemerná hodnota nemusí zachytiť kry, zmladenie a potlačené stromy, ktoré funkčnú vzdialenosť medzi povrchom a korunou znižujú. Rovnako môže byť zavádzajúce určenie výšky podľa najnižšej jednotlivkej vetvy, ktorá nemusí byť súčasťou súvislej vrstvy schopnej podporiť horenie.

Viedma et al. (2024) preto navrhli hodnotenie vertikálnej kontinuity pomocou profilov hustoty vegetácie odvodených z údajov laserového skenovania. Postup umožňuje identifikovať jednotlivé palivové vrstvy, ich spodnú a hornú hranicu, hĺbku a medzery medzi vrstvami. Takéto vyjadrenie poskytuje podrobnejší obraz než samotná výška korunovej bázy a je vhodné najmä pre porasty s viacerými vegetačnými úrovňami.

Význam vertikálnej kontinuity potvrdila aj analýza založená na družicových lidarových údajoch GEDI. Hakkenberg et al. (2024) zistili, že ukazovatele rebríkového paliva a vertikálneho prepojenia vegetácie vysvetľovali závažnosť požiarov konzistentnejšie než celkový objem korunovej vegetácie. Výsledky naznačujú, že pre priebeh požiaru nie je rozhodujúce iba množstvo biomasy, ale aj jej rozloženie medzi povrchom a hornou časťou porastu.

Vertikálnu kontinuitu nemožno hodnotiť nezávisle od intenzity povrchového požiaru a vlhkosti korunového paliva. Aj nízko položená koruna môže zostať nezapálená pri slabom povrchovom horení vo vlhkom palive. Naopak, vysoké plamene, silný vietor a prítomnosť rebríkového paliva môžu umožniť zapálenie korún aj pri väčšej priemernej výške korunovej bázy. Priestorové ukazovatele preto musia byť pri modelovaní prepojené s palivovými a meteorologickými vstupmi.

Horizontálna a vertikálna kontinuita sa v reálnom poraste navzájom ovplyvňujú. Vysoká vertikálna kontinuita môže umožniť zapálenie jednotlivých korún, ale ak medzi korunami chýba horizontálne prepojenie, požiar sa nemusí v korunovej vrstve ďalej šíriť. Naopak, súvislá korunová vrstva sama osebe nestačí na vznik aktívneho korunového požiaru, ak povrchový požiar nedosiahne potrebnú intenzitu a chýba cesta na vertikálny prenos horenia.

Priestorové usporiadanie môže viesť k rozdielnym formám korunového požiaru. V poraste s vysokou vertikálnou a nízkou horizontálnou kontinuitou môže dochádzať k opakovanému vzplanutiu jednotlivých stromov alebo skupín stromov. Pri vysokej vertikálnej aj horizontálnej kontinuite sa zvyšuje potenciál prechodu do súvislého aktívneho korunového požiaru. Pri nízkej vertikálnej kontinuite a súvislej korunovej vrstve môže zostať požiar povrchový, pokiaľ jeho intenzita nepostačuje na prekonanie vzdialenosti ku korunám.

Najnovšie práce založené na trojrozmerných údajoch potvrdzujú, že zjednodušené porastové priemery nemusia zachytiť kombinovaný účinok oboch foriem kontinuity. Výsledky modelovania skupín stromov ukázali, že vertikálne rozloženie paliva spolu s horizontálnou vzdialenosťou medzi korunami ovplyvňuje prenos tepla, zapojenie korún a spotrebu paliva (Parsons et al., 2023). Trojrozmerné zobrazenie porastu preto poskytuje vhodnejší podklad pre podrobné hodnotenie než jedna hodnota zápoja a jedna priemerná výška korunovej bázy.

Terénne hodnotenie horizontálnej kontinuity povrchového paliva možno vykonať pomocou odhadu pokryvnosti, merania veľkosti a vzdialenosti medzier, líniového snímkovania alebo podrobného

mapovania odberovej plochy. Metodika musí určiť minimálnu veľkosť medzery, ktorá sa zaznamenáva, a priestorovú mierku, na ktorej sa kontinuita vyhodnocuje.

Jednoduchý odhad percentuálnej pokrývnosti nemusí dostatočne vystihnúť priestorové usporiadanie. Dve plochy môžu mať rovnaký podiel paliva, ale v jednej je palivo rozložené rovnomerne a v druhej vytvára niekoľko oddelených skupín. Vhodné je preto doplniť pokrývnosť o údaj o priemernej alebo maximálnej veľkosti medzier, prípadne o podiel plochy tvoriacej súvislú palivovú vrstvu.

Vertikálnu kontinuitu možno v teréne hodnotiť rozdelením porastu do výškových intervalov a zaznamenaním prítomnosti, pokrývnosti alebo hustoty paliva v každom intervale. Takýto postup umožňuje zachytiť viacvrstvové porasty a identifikovať prerušenia medzi povrchovým palivom, podrastom a korunovou vrstvou. Súčasne treba rozlíšiť živé a odumreté palivo, pretože ich vlhkosť a zapáliteľnosť sa môžu výrazne líšiť.

Pri podrobnom hodnotení možno zaznamenať výšku spodnej a hornej hranice každej vrstvy, jej priemernú hĺbku, horizontálnu pokrývnosť a najmenšiu zvislú vzdialenosť k susednej vrstve. Výsledkom nie je iba jedna hodnota kontinuity, ale vertikálny profil palivového komplexu. Tento prístup je vhodný na kalibráciu údajov diaľkového prieskumu Zeme a na overovanie modelov prechodu požiaru do korún.

Laserové skenovanie umožňuje zachytiť trojrozmerné rozmiestnenie vegetácie a odvodiť ukazovatele horizontálnej a vertikálnej kontinuity. Pozemné a mobilné laserové skenovanie poskytuje podrobné údaje o podrastových vrstvách, kmeňoch, vetvách a medzerách v poraste. Letecké laserové skenovanie pokrýva väčšie územie a je vhodné najmä na hodnotenie výšky, zápoja a štruktúry korunovej vrstvy.

Jednotlivé platformy však nezachytávajú palivové vrstvy rovnako. Signál leteckého laserového skenovania je v hustých porastoch čiastočne blokovaný hornými korunami a počet bodov v spodnej vrstve môže byť nízky. Pozemné skenovanie poskytuje podrobnejšie údaje o podraсте, ale jeho rozsah je menší a časť vegetácie môže byť zatienená kmeňmi a blízkymi vetvami. Najspoľahlivejší opis preto vzniká kombináciou vhodných platforiem a terénnych meraní.

Xi et al. (2023) využili pozemné laserové skenovanie na rozlíšenie drevných palivových prvkov a rekonštrukciu ich trojrozmernej polohy. Viedma et al. (2024) rozšírili využitie lidarových profilov na automatizované určovanie jednotlivých vertikálnych palivových vrstiev. Vývoj týchto postupov umožňuje prejsť od jednoduchých priemerných ukazovateľov ku konkrétnejšiemu opisu spojitosti paliva.

Lidarové údaje však opisujú predovšetkým geometriu a priestorové vzťahy vegetácie, nie priamo jej suchú hmotnosť, vlhkosť ani požiarne vlastnosti. Vysoká hustota bodov môže indikovať hustú vegetačnú vrstvu, ale vzťah medzi počtom návratov a množstvom paliva závisí od druhu vegetácie, senzora, uhla snímania a použitého algoritmu. Odvođené ukazovatele kontinuity preto vyžadujú kalibráciu a overenie terénnymi údajmi.

Aktuálne práce poukazujú aj na rozdielnú citlivosť lidarových platforiem. Pozemné skenovanie dokáže podrobnejšie rozlíšiť koruny, kroviny, trávny, ležiacie drevo a opad, zatiaľ čo letecké skenovanie má v hustých porastoch obmedzenejšiu schopnosť zachytiť palivo pri povrchu. Pri výbere zdroja údajov preto treba vychádzať z vrstvy, ktorá je predmetom hodnotenia, a z požadovanej priestorovej podrobnosti.

V geografickom informačnom systéme možno horizontálnu kontinuitu vyjadriť ako podiel pokrytia palivom, veľkosť súvislých plôch, hustotu medzier, vzdialenosť medzi palivovými prvkami alebo pomocou ukazovateľov priestorovej konfigurácie. Výber ukazovateľa závisí od typu paliva a mierky hodnotenia.

Pri rastrovom spracovaní sa kontinuita často odvodzuje zo susedstva buniek rovnakej alebo podobnej palivovej triedy. Takýto postup je jednoduchý, výsledok však závisí od veľkosti bunky a pravidla určujúceho susednosť. Dve palivové plochy môžu byť v rastri označené ako prepojené, hoci medzi skutočnými palivovými prvkami existuje medzera významná pre šírenie požiaru. Naopak, jemnejší raster môže rozdeliť funkčne súvislú vrstvu v dôsledku chýb klasifikácie.

Vektorové spracovanie umožňuje analyzovať veľkosť a tvar palivových plôch, ich vzájomnú vzdialenosť a prítomnosť lineárnych prerušení. Pri krajinnom hodnotení možno sledovať koridory súvislého paliva, ich orientáciu voči prevládajúcemu vetru a napojenie na územia s vysokým množstvom paliva, resp. hustotou paliva. Takáto analýza je vhodná na identifikáciu možných smerov šírenia, nepredstavuje však sama osebe predpoveď konkrétneho požiaru.

Vertikálnu kontinuitu možno vyjadriť počtom palivových vrstiev, podielom zaplnených výškových intervalov, veľkosťou medzier medzi vrstvami, výškou korunovej bázy alebo zloženým indexom. Ak sa vytvára zložený ukazovateľ, musí byť jasne opísané, z ktorých údajov vznikol, ako boli jednotlivé vrstvy vážené a aký význam majú výsledné triedy.

Priestorová bunka s jemným rozlíšením nevytvára automaticky podrobnú informáciu o kontinuite. Ak bol vstupný údaj odvodený pre celý porast alebo z lidarového produktu s hrubším rozlíšením, jeho prevzorkovanie na bunku 10 × 10 m nezvyšuje skutočnú informačnú podrobnosť. Výstupná geodatabáza musí preto uchovávať aj zdroj, pôvodné rozlíšenie a spôsob odvodu hodnoty.

Hospodárske a preventívne zásahy môžu meniť horizontálnu aj vertikálnu kontinuitu paliva. Odstránenie alebo rozrušenie súvislej vrstvy jemného povrchového paliva znižuje možnosť plynulého šírenia po povrchu. Redukcia krovín, prirodzeného zmladenia a suchých spodných vetiev zväčšuje medzery medzi povrchom a korunovou vrstvou. Zníženie hustoty stromov môže prerušiť alebo oslabiť horizontálnu kontinuitu korún.

Jednotlivé zásahy však môžu mať aj dočasné nežiaduce účinky. Prerezávka, prebierka alebo odstraňovanie podrastu vytvára drevné zvyšky, ktoré po ponechaní na ploche zvyšujú množstvo jemného povrchového paliva. Otvorenie porastu môže zvýšiť dopad slnečného žiarenia a prúdenie vzduchu pri povrchu, a tým urýchliť vysušovanie zostávajúceho paliva. Účinok zásahu preto nemožno hodnotiť iba podľa zmeny korunového zápoja alebo výšky korunovej bázy.

Najvyššiu účinnosť majú spravidla kombinované opatrenia, pri ktorých sa súčasne rieši povrchové palivo, rebríkové palivo a podľa potreby aj hustota korunovej vrstvy. Výber postupu musí rešpektovať typ lesa, ekologické obmedzenia, hospodárske ciele, dostupnosť územia a predpokladanú dobu účinnosti. Jednorazové narušenie kontinuity nemusí byť trvalé, pretože bylinná a krovinná vegetácia sa obnovuje a opad sa opätovne hromadí.

Po zásahu je potrebné kontinuitu znovu posúdiť. Kontrolné hodnotenie by malo zachytiť nielen bezprostredný stav, ale aj vývoj počas nasledujúcich rokov. Obnova podrastu, opad vetiev a rozklad ponechaných zvyškov môžu postupne meniť funkciu jednotlivých vrstiev.

Horizontálna a vertikálna kontinuita predstavujú samostatné charakteristiky palivového komplexu a nemajú sa nahrádzať údajom o celkovom množstve paliva. Plocha sa môže vyznačovať veľkým množstvom paliva, ale zároveň jeho kontinuita môže byť nízka, ak je palivo sústredené do oddelených skupín. Naopak, malé množstvo jemného paliva môže vytvoriť veľmi súvislú vrstvu schopnú rýchleho šírenia požiaru.

Pri terénnom zisťovaní je preto potrebné okrem množstva paliva zaznamenávať jeho pokryvnosť, veľkosť medzier, výškové rozdelenie a vzájomnú vzdialenosť vrstiev. Pri mapovaní treba rozlišovať horizontálnu kontinuitu povrchového paliva, kontinuitu rebrikového paliva a horizontálnu kontinuitu korún. Každá z týchto charakteristík má odlišný význam a vyžaduje odlišný zdroj údajov.

Pri hodnotení nebezpečenstva a rizika vzniku požiaru sa horizontálna kontinuita jemného paliva uplatňuje ako podmienka, ktorá umožňuje, aby počiatočné horenie prerástlo do samostatne sa šíiaceho požiaru. Vertikálna a korunová kontinuita sa viažu predovšetkým na možné správanie požiaru po jeho vzniku. Ich spoločné zaradenie do jedného nerozlíšeného ukazovateľa by viedlo k miešaniu príčin vzniku požiaru s podmienkami jeho ďalšieho šírenia.

Kontinuita paliva sa v čase mení vplyvom rastu vegetácie, opadu, rozkladu, hospodárskych zásahov, kalamít a požiarov. Výsledky jej hodnotenia preto musia byť časovo označené a pravidelne aktualizované. Osobitná aktualizácia je potrebná po udalostiach, ktoré výrazne zmenia štruktúru porastu, napríklad po ťažbe, veternej kalamite, podkôrnikovej kalamite alebo rozsiahlejšom preventívnom zásahu.

Podrobný opis horizontálnej a vertikálnej kontinuity vytvára podklad na výber palivového modelu, hodnotenie možnosti prenosu požiaru medzi vrstvami, modelovanie jeho správania a návrh opatrení na úpravu palivového komplexu. Kontinuita však musí byť vždy interpretovaná spolu s množstvom, vlhkosťou a požiarovými vlastnosťami paliva, pretože samotná geometrická spojitosť nevyjadruje jeho aktuálnu schopnosť zapálenia a horenia.

1.7. Množstvo paliva a jeho význam pre intenzitu požiaru

Množstvo paliva vyjadruje hmotnosť horľavého materiálu na jednotku plochy. Najčastejšie sa uvádza v $t \cdot ha^{-1}$ alebo $kg \cdot m^{-2}$ a vzťahuje sa buď na celý palivový komplex, alebo na jeho jednotlivé zložky, napríklad opad, hrabanku, bylinné palivo, drobné drevné palivo alebo hrubú drevnú hmotu (Brown, 1974; Keane, 2015). Množstvo paliva je dôležité preto, lebo určuje potenciálne množstvo energie, ktoré môže byť počas požiaru uvoľnené.

Vzťah medzi množstvom paliva a intenzitou požiaru však nie je jednoduchý. Väčšie množstvo paliva môže viesť k vyššej intenzite a dlhšiemu trvaniu horenia, ale iba vtedy, ak je palivo dostupné pre horenie a má vhodné vlhkosťové a štruktúrne podmienky (Keane, 2015; McNorton a Di Giuseppe, 2024). Veľké množstvo vlhkého alebo kompaktného paliva nemusí viesť k rýchlemu šíreniu požiaru. Naopak, menšie množstvo suchého, jemného a súvislého paliva môže umožniť rýchlu iniciáciu a rýchle šírenie povrchového požiaru (Rothermel, 1972; Scott a Burgan, 2005).

Pri hodnotení množstva paliva je nevyhnutné rozlišovať veľkostné frakcie. 1-hodinové a 10-hodinové palivo majú najväčší význam pre zapálenie (iniciáciu) a rýchle šírenie čela povrchového požiaru, pretože rýchlo reagujú na počasie a ľahko sa zapália (Anderson, 1982; Scott a Burgan, 2005). 100-hodinové a 1000-hodinové palivo majú väčší význam pre intenzitu, dlhšie horenie, dohorievanie

a dopady požiaru na životné prostredie, najmä pri dlhodobom suchu (Keane, 2015; McNorton a Di Giuseppe, 2024).

Množstvo paliva sa mení podľa typu porastu, veku, drevinového zloženia, stanovištných podmienok, hustoty porastu, spôsobu hospodárenia a výskytu poškodení lesa (Keane, 2015). V mladých hustých porastoch môže byť významný podiel živého jemného paliva a rebríkového paliva. V starších porastoch môže narastať množstvo hrubého odumretého dreva. V kalamitných porastoch môže byť množstvo paliva výrazne vyššie v dôsledku ležiacich kmeňov, konárov, kôry, koreňových vývrátov a ťažbových zvyškov (Majlingová et al., 2018; Kačíková et al., 2020).

Súčasnú hodnotenie množstva paliva využíva kombináciu terénneho zisťovania a diaľkového prieskumu Zeme. Terénne metódy poskytujú detailné údaje o hmotnosti a zložení paliva, ale sú časovo náročné a pri veľkom území obmedzené (Brown, 1974; Keane, 2015). Satelitné snímky, LiDAR, radarové údaje a globálne modely palivových charakteristík umožňujú odhadovať palivové charakteristiky priestorovo kontinuálne, avšak vyžadujú kalibráciu a validáciu terénnymi údajmi (McNorton a Di Giuseppe, 2024; Viedma et al., 2024).

McNorton a Di Giuseppe (2024) zdôrazňujú, že globálne hodnotenie palivových charakteristík si vyžaduje kombináciu meteorologických premenných, modelov povrchu krajiny a satelitných pozorovaní. Samotné indexy založené iba na počasí nedokážu dostatočne zachytiť priestorové rozdiely v dostupnosti paliva a jeho množstve. Tento poznatok je dôležitý aj pre národné hodnotenie, pretože priestorové rozdiely v palive môžu výrazne meniť potenciálne správanie požiaru aj pri rovnakých meteorologických podmienkach.

V slovenskom prostredí je systematická kvantifikácia paliva dôležitá najmä pre tvorbu palivových modelov, hodnotenie požiarneho rizika a prípravu vstupov do modelovania správania požiaru (Majlingová et al., 2018; Kačíková et al., 2020). Údaje o množstve povrchového a korunového paliva umožňujú lepšie rozlíšiť územia s nízkym a vysokým požiarnym zaťažím, identifikovať rizikové lokality a vytvoriť podklady pre preventívne opatrenia v lesnom hospodárstve a protipožiarnej ochrane.

1.8. Vlhkosť paliva a jej vplyv na zapáliteľnosť a šírenie požiaru

Vlhkosť lesného paliva patrí medzi najvýznamnejšie dynamické vlastnosti palivového komplexu. Vyjadruje množstvo vody obsiahnutej v palive a ovplyvňuje, koľko energie je potrebné na jeho zahriatie, vysušenie a dosiahnutie podmienok potrebných na tepelný rozklad a zapálenie. Vlhkosť paliva preto ovplyvňuje nebezpečenstvo a riziko vzniku požiaru a po jeho iniciácii aj rýchlosť šírenia, intenzitu horenia, spotrebu paliva, dĺžku plameňa a možnosť prechodu požiaru medzi jednotlivými palivovými vrstvami (Rothermel, 1972; Drysdale, 2011; Matthews, 2014; Keane, 2015).

Voda obsiahnutá v palive pôsobí ako významná tepelná záťaž. Pred začiatkom intenzívneho tepelného rozkladu sa musí zohriať a následne odpariť. Časť energie dodanej iniciálnym zdrojom alebo horiacim susedným palivom sa preto nespotrebuje na zvyšovanie teploty organickej hmoty, ale na zmenu skupenstva vody. So zvyšujúcou sa vlhkosťou sa spravidla predlžuje čas do zapálenia, znižuje pravdepodobnosť úspešnej iniciácie a obmedzuje rýchlosť uvoľňovania horľavých produktov tepelného rozkladu.

Pri nízkej vlhkosti sa palivo rýchlejšie zohrieva a skôr dosahuje teplotné podmienky potrebné na uvoľňovanie horľavých plynov. Tento účinok je najvýraznejší pri jemnom odumretom palive, ktoré má vysoký pomer povrchu k objemu a nízku tepelnú zotrvačnosť. Suché ihličie, lístie, odumreté stebľa tráv a drobné vetvičky sa preto môžu zapáliť od relatívne slabého iniciačného zdroja a po zapálení preniesť horenie na ďalšie časti palivovej vrstvy.

Vlhkosť paliva sa v priestore a čase výrazne mení. Odlišná môže byť medzi jednotlivými druhmi vegetácie, živým a odumretým palivom, rôznymi veľkostnými triedami, povrchovou a korunovou vrstvou, okrajom a vnútrom porastu alebo medzi zatieneným a oslneným stanovišťom. Jedna hodnota vlhkosti preto nemôže reprezentovať celý palivový komplex. Pri meraní, modelovaní a mapovaní je potrebné vždy uviesť, ku ktorému typu paliva, veľkostnej triede, palivovej vrstve, miestu a času sa hodnota vzťahuje.

V požiarom výskume sa vlhkosť paliva najčastejšie vyjadruje ako hmotnosť vody pripadajúca na suchú hmotnosť materiálu. Tento spôsob sa označuje ako vlhkosť na suchú hmotnostnú bázu (7):

$$M = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (7)$$

kde:

M – vlhkosť paliva (%)

m_w – hmotnosť vlhkej vzorky (g)

m_d – hmotnosť vzorky po vysušení do konštantnej hmotnosti (g)

Pri živom palive môže takto vypočítaná vlhkosť presiahnuť 100 %, pretože hmotnosť vody môže byť vyššia než suchá hmotnosť organického materiálu. Hodnota 100 % na suchej hmotnostnej báze znamená, že hmotnosť vody sa rovná suchej hmotnosti vzorky.

V iných odboroch sa môže vlhkosť vyjadrovať na mokrú hmotnostnú bázu, teda ako podiel hmotnosti vody na celkovej hmotnosti vlhkej vzorky (8):

$$M_w = \frac{m_w - m_d}{m_w} \cdot 100 \quad (8)$$

kde:

M_w – vlhkosť vzťahovaná na mokrú hmotnosť (%)

Hodnoty vypočítané na suchej a mokrej hmotnostnej báze nie sú totožné. Pri každom výsledku preto musí byť výslovne uvedený spôsob výpočtu. V modeloch správania požiaru a pri hodnotení vlhkosti lesného paliva sa spravidla používa suchá hmotnostná báza.

Vzájomný prepočet možno zapísať (9):

$$M = \frac{M_w}{100 - M_w} \cdot 100 \quad (9)$$

a opačne (10):

$$M_w = \frac{M}{100 + M} \cdot 100 \quad (10)$$

Pri porovnávaní údajov z rozdielnych zdrojov je potrebné overiť nielen spôsob výpočtu, ale aj použitú teplotu sušenia, čas sušenia, kritérium konštantnej hmotnosti a spôsob uchovania vzorky pred vážením.

Rozdielne laboratórne postupy môžu viesť k rozdielnym hodnotám aj pri materiáli odobratom z rovnakého miesta.

Odumreté palivo nemá fyziologickú schopnosť regulovať obsah vody. Vodu prijíma a stráca pôsobením zrážok, rosy, relatívnej vlhkosti vzduchu, teploty, slnečného žiarenia, vetra a kontaktu s pôdou alebo iným vlhkým materiálom. Jeho vlhkosť sa preto priebežne približuje k rovnovážnej hodnote zodpovedajúcej okolitým podmienkam.

Ak je odumreté palivo suchšie než zodpovedajúca rovnovážna vlhkosť, prijíma vodnú paru zo vzduchu. Ak je vlhšie, vodu odovzdáva. Proces prijímania a straty vody neprebíha úplne rovnakou cestou. Pri rovnakej teplote a relatívnej vlhkosti môže mať materiál mierne odlišný obsah vody podľa toho, či predtým vysychal alebo vlhol. Tento jav sa označuje ako hystereza sorpcie a je jedným z dôvodov, prečo jednoduché rovnovážne vzťahy nedokážu presne opísať všetky krátkodobé zmeny vlhkosti.

Rovnovážnu vlhkosť ovplyvňuje predovšetkým relatívna vlhkosť a teplota vzduchu. Vyššia relatívna vlhkosť podporuje prijímanie vody palivom, zatiaľ čo vyššia teplota pri rovnakej relatívnej vlhkosti spravidla vedie k nižšej rovnovážnej vlhkosti. V skutočnom lesnom prostredí sa však tieto veličiny neustále menia a palivo často nemá dostatok času na dosiahnutie rovnováhy.

Zrážky môžu zvýšiť vlhkosť odumretého paliva priamym zmáčaním. Množstvo zachytenej vody závisí od intenzity a trvania zrážok, tvaru a polohy palivových častíc, hrúbky palivovej vrstvy a od prítomnosti korunového krytu. Časť zrážok zachytia koruny stromov a následne sa odparí, stečie po kmeňoch alebo dopadne na povrch s časovým oneskorením. Vlhkosť povrchového paliva pod porastom preto nemožno presne odvodiť iba z úhrnu zrážok zaznamenaného na otvorenej meteorologickej stanici.

Významným zdrojom vody môže byť rosa a kondenzácia vodnej pary počas noci. Jemné palivo pri povrchu môže zvlhnúť aj bez merateľných zrážok. Po východe slnka sa však voda môže rýchlo odpariť, najmä na otvorených, južne orientovaných alebo vetru vystavených plochách. Nebezpečenstvo vzniku požiaru sa preto môže počas jedného dňa výrazne meniť.

Aktuálne porovnania modelov vlhkosti odumretého paliva potvrdzujú, že presnosť závisí od typu paliva a miestnych podmienok. Perello et al. (2024) navrhli prispôsobiteľný model hodinovej dynamiky, ktorého parametre možno kalibrovať pre rozdielne druhy odumretého paliva. Výsledky podporujú používanie miestne overených parametrov namiesto automatického prenosu jednej univerzálnej rovnice do všetkých porastov.

Rýchlosť, akou odumreté palivo reaguje na zmenu podmienok prostredia, závisí najmä od rozmerov palivových častíc. Jemné častice majú veľký povrch vzhľadom na svoju hmotnosť a vodu vymieňajú rýchlo. Hrubé časti reagujú pomalšie, pretože voda a teplo musia prenikať do väčšieho objemu materiálu.

Na zjednodušené vyjadrenie tejto odozvy sa používajú časové triedy 1 h, 10 h, 100 h a 1 000 h. Číselné označenie nepredstavuje dobu úplného vysušenia, čas horenia ani vek paliva. Vyjadruje približnú časovú konštantu vlhkostnej odozvy idealizovanej palivovej častice na zmenu okolitého prostredia.

Pri náhlej zmene rovnovážnej vlhkosti možno zjednodušenú odozvu paliva vyjadriť (11):

$$M_t = E + (M_0 - E)e^{-t/\tau} \quad (11)$$

kde:

M_t – vlhkosť paliva v čase t (%)
 E – rovnovážna vlhkosť paliva (%)
 M_0 – počiatočná vlhkosť paliva (%)
 t – čas od zmeny podmienok,
 τ – časová konštanta palivovej triedy.

Po uplynutí jednej časovej konštanty sa odstráni približne 63 % rozdielu medzi počiatočnou a novou rovnovážnou vlhkosťou. Palivo sa teda po jednej hodine, desiatich hodinách alebo inom čase uvedenom v názve triedy nestane úplne suchým ani úplne vyrovnaným s prostredím.

Jedn hodinové palivo zahŕňa najjemnejšie odumreté časti, spravidla s priemerom do približne 6 mm. Patria sem ihličie, lístie, suché trávy, odumreté bylinné zvyšky a najjemnejšie vetvičky. Jeho vlhkosť sa môže výrazne meniť počas niekoľkých hodín, preto má rozhodujúci význam pri krátkodobom hodnotení nebezpečenstva vzniku požiaru a pri posudzovaní možnosti, že počiatočné zapálenie prerastie do šíriaceho sa povrchového požiaru.

Desaťhodinové palivo predstavujú drobné vetvy a drevné časti s väčším priemerom. Jeho vlhkosť reaguje na denný priebeh počasia, ale menej prudko než pri jedn hodinovej triede. Na meteorologických staniciach sa môžu používať štandardizované drevené palivové tyčinky alebo automatické snímače, ktoré približne reprezentujú vlhkosťnú odozvu tejto triedy.

Sto hodinové palivo zahŕňa hrubšie vetvy, ktorých vlhkosť odráža viacdenný priebeh počasia. Krátkodobé zvýšenie teploty alebo pokles relatívnej vlhkosti nemusí výrazne zmeniť obsah vody v celom priereze. Táto trieda sa významnejšie vysušuje počas dlhšieho obdobia bez zrážok.

Tisí hodinové palivo tvoria hrubé konáre, kmene, pne a ďalšie veľké drevné časti. Vnútorňa vlhkosť sa mení počas týždňov až dlhších období. Výrazné preschnutie poukazuje na dlhodobu nepriaznivú vodnú bilanciu a môže zvyšovať podiel hrubého paliva dostupného pre dlhotrvajúce horenie a žeravenie.

Časové triedy sú modelovým zjednodušením. Skutočná vlhkosťná odozva závisí aj od dreveny, hustoty dreva, prítomnosti kôry, stupňa rozkladu, orientácie častice, polohy nad povrchom, zatienenia a kontaktu s pôdou. Silne rozložené drevo môže prijímať a zadržiavať vodu inak než čerstvo odumreté drevo rovnakého priemeru.

V podmienkach Slovenska majú pri krátkodobom hodnotení nebezpečenstva a rizika vzniku požiaru osobitný význam jedn hodinové a desaťhodinové palivo. Po ústupe snehovej pokrývky môžu minuloročné trávy, bylinné zvyšky, ihličie, lístie a jemné vetvičky rýchlo preschnúť. Napriek vlhkejšej pôde tak môže na povrchu vzniknúť súvislá vrstva paliva pripravená na zapálenie.

Vlhkosť živého paliva je výsledkom vzájomného pôsobenia príjmu vody koreňmi, jej transportu v rastline, straty transpiráciou, rastovej fázy a fyziologickej reakcie na prostredie. Na rozdiel od odumretého paliva sa preto nedá spoľahlivo určiť iba z okamžitej teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu.

Živé palivo zahŕňa listy, ihličie, živé vetvičky, trávy, byliny, kry, prirodzené zmladenie a jemné korunové časti. Jednotlivé druhy a rastlinné orgány môžu mať výrazne rozdielny obsah vody. Nové výhonky a mladé listy bývajú spravidla vlhkejšie než staršie časti. V priebehu vegetačného obdobia sa mení podiel vody, suchej hmoty aj chemické zloženie tkanív.

Pri dostatku pôdnej vody si rastlina môže zachovať relatívne vysokú vlhkosť aj počas krátkeho teplého obdobia. Pri dlhšie trvajúcom suchu klesá vodný potenciál pôdy, obmedzuje sa príjem vody a rastlina uzatvára prieduchy. Ak vodný deficit pokračuje, znižuje sa obsah vody v listoch, ihličí a jemných vetvách. Vlhkosť živého paliva tak odráža nielen aktuálne počasie, ale aj predchádzajúci priebeh zrážok, pôdnu zásobu vody, hĺbku koreňového systému a fyziologickú odolnosť druhu.

Chemické zloženie živého paliva môže jeho reakciu na tepelné pôsobenie meniť. Živice, terpény, silice, vosky a ďalšie extraktívne látky môžu pri zahrievaní uvoľňovať horľavé produkty. Dva druhy s rovnakou vlhkosťou preto nemusia mať rovnakú zapáliteľnosť ani rovnaký priebeh horenia. Vlhkosť je rozhodujúca, nie však jediná požiarne vlastnosť živého paliva.

Aktuálna databáza Globe-LFMC 2.0 obsahuje viac než 280 000 terénnych meraní vlhkosti živého paliva zo stoviek lokalít a záznamy do roku 2023. Veľký rozsah údajov zároveň ukazuje, že hodnoty sú silne závislé od druhu vegetácie, rastlinného orgánu, sezóny a miestnych podmienok. Univerzálna hranica použiteľná pre všetky druhy a regióny preto nie je odborne odôvodnená (Yebra et al., 2024).

Vlhkosť živého paliva možno stanoviť gravimetricky rovnakým základným vzťahom ako pri odumretom palive (12):

$$M_L = \frac{m_f - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (12)$$

kde:

M_L – vlhkosť živého paliva (%)

m_f – hmotnosť čerstvej vzorky (g)

m_d – suchá hmotnosť vzorky (g)

Pri odbere je potrebné určiť druh rastliny, odoberaný orgán, vek výhonku, polohu v korune, expozíciu a denný čas. Zmiešanie mladých a starších listov, živých vetvičiek a drevnatých častí môže viesť k hodnote, ktorú nemožno jednoznačne interpretovať.

Zapáliteľnosť vyjadruje schopnosť paliva zapáliť sa pri pôsobení určitého iniciačného zdroja. Vlhkosť ovplyvňuje čas potrebný na zapálenie, minimálnu energiu iniciačného zdroja aj pravdepodobnosť, že po odstránení zdroja bude horenie pokračovať.

Pri vyššej vlhkosti sa pred začiatkom tepelného rozkladu musí zohriať a odpariť väčšie množstvo vody. Povrch paliva sa súčasne ochladzuje odparovaním. Slabá iskra alebo krátkodobý pôsobiaci plameň preto nemusí dodať dostatok energie na vytvorenie stabilnej reakčnej zóny. Pri nízkej vlhkosti sa potrebná energia znižuje a rastie pravdepodobnosť úspešnej iniciácie.

Vzťah medzi vlhkosťou a zapáliteľnosťou nie je rovnaký pre všetky iniciačné zdroje. Otvorený plameň môže pôsobiť dlhšie a na väčšiu plochu než drobná iskra. Žeravá častica môže palivo zahrievať dlhší čas, ale jej účinok závisí od hmotnosti, teploty, materiálu a kontaktu s palivovým lôžkom. Kritická vlhkosť preto nie je univerzálnou vlastnosťou materiálu, ale výsledkom konkrétnej skúšobnej situácie.

Význam má aj štruktúra palivového lôžka. Voľná vrstva jemného materiálu umožňuje prístup kyslíka a môže zachytiť žeravú časticu medzi palivovými prvkami. Veľmi zhutnená vrstva obmedzuje prevzdušnenie, ale môže udržať teplo v mieste kontaktu. Pri interpretácii výsledkov skúšok treba preto uvádzať nielen vlhkosť, ale aj množstvo paliva, hĺbku vrstvy, objemovú hustotu a spôsob uloženia.

V modeloch povrchového požiaru sa používa pojem vlhkosť vyhasnutia odumretého paliva. Predstavuje modelovú hodnotu vlhkosti, pri ktorej už palivové lôžko za stanovených podmienok nepodporuje samostatné šírenie požiaru. Nejde o univerzálnu hranicu, nad ktorou palivo nemôže vôbec horieť.

Vlhkosť vyhasnutia je parametrom palivového modelu a súvisí s jeho štruktúrou, množstvom jemného paliva, minerálnym obsahom a ďalšími vlastnosťami. Palivo s vlhkosťou vyššou než modelová hodnota môže horieť pri pôsobení intenzívneho vonkajšieho zdroja, pri zmiešaní so suchším palivom alebo pri odlišnej geometrickej konfigurácii.

Pri živom palive nemožno vlhkosť vyhasnutia interpretovať rovnakým spôsobom ako pri odumretom palive. Niektoré modely odvodzujú účinok vlhkosti živého paliva aj od vlhkosti odumretej zložky a od podielu živého a odumretého paliva. Takýto výpočet je modelovým zjednodušením a nemá sa zamieňať s priamo nameranou biologickou alebo fyzikálnou hranicou.

Po vzniku požiaru ovplyvňuje vlhkosť množstvo tepla potrebného na prípravu paliva pred čelom požiaru. Pri vyššej vlhkosti sa časť energie spotrebuje na odparovanie vody a na zohriatie vzniknutej vodnej pary. Znižuje sa množstvo energie dostupné na tepelný rozklad a prenos horenia na ďalšie častice.

Pri suchom jemnom palive prebieha príprava na zapálenie rýchlo a čelo požiaru sa môže šíriť vyššou rýchlosťou. Vyššia vlhkosť spravidla rýchlosť šírenia znižuje. Konkrétny účinok závisí aj od vetra, sklonu svahu, množstva dostupného paliva, hĺbky vrstvy a kontinuity paliva.

Vlhkosť ovplyvňuje tiež podiel paliva spotrebovaného v aktívnej zóne horenia. Jemné suché palivo sa môže spotrebovať takmer úplne. Pri vyššej vlhkosti môže časť materiálu zostať nezhorená alebo iba zuhoľnatená. Prostredníctvom množstva spotrebovaného paliva a rýchlosti šírenia tak vlhkosť nepriamo ovplyvňuje intenzitu čela požiaru.

Pri korunovom požiari je významná vlhkosť jemného korunového paliva, predovšetkým listov, ihličia a najjemnejších vetvičiek. Vyššia vlhkosť zvyšuje množstvo energie potrebné na zapálenie korún. Nízka vlhkosť sama osebe nespôsobí prechod povrchového požiaru do korunovej vrstvy, ale znižuje intenzitu povrchového požiaru potrebnú na zapálenie korunového paliva.

Pri hrubom palive sa vlhkosť prejavuje najmä v dĺžke horenia a v podiele spotrebovanej hmoty. Povrch hrubého kusu môže vyschnúť a zapáliť sa, zatiaľ čo vnútro zostáva vlhké. Počas dlhotrvajúceho sucha sa vysušuje väčšia časť prierezu a rastie možnosť hlbšieho zuhoľnatenia, žeravenia a dlhodobého uvoľňovania tepla.

Teplota a relatívna vlhkosť vzduchu patria medzi základné meteorologické premenné ovplyvňujúce jemné odumreté palivo. Ich spoločný účinok možno vyjadriť aj deficitom tlaku vodnej pary, ktorý charakterizuje vysušovaciu schopnosť atmosféry. Vysoký deficit vytvára silný gradient medzi palivom a vzduchom a podporuje stratu vody.

Nolan et al. (2024) pri globálnom porovnaní jednoduchých modelov jednoodhodinového paliva zistili dobré výsledky modelov založených na deficite tlaku vodnej pary. Najvyššia neistota však zostávala pri veľmi nízkej vlhkosti paliva pod približne 10 %, teda v rozsahu významnom pre zapálenie a rýchle šírenie. Výsledok zdôrazňuje potrebu terénneho overovania práve počas najnebezpečnejších suchých období.

Vietor podporuje vysušovanie tým, že odstraňuje vlhkú hraničnú vrstvu vzduchu pri povrchu palivovej častice. Súčasne mení polohu opadu a môže odkryť spodné vrstvy. Slnečné žiarenie zvyšuje teplotu

paliva nad teplotu okolitého vzduchu, preto môže byť palivo na oslnenom mieste výrazne suchšie než materiál rovnakého typu v tieni.

Korunový kry mení množstvo žiarenia, zrážok a vetra dopadajúcich na povrch. Vo vnútri zapojeného porastu býva nižšia denná teplota, vyššia relatívna vlhkosť a slabší vietor. Jemné palivo preto môže vysychať pomalšie než na okraji lesa alebo na otvorenej ploche. V noci však môže hustá korunová vrstva obmedziť radiačné ochladzovanie povrchu a tvorbu rosy. Výsledná vlhkosť závisí od konkrétnej štruktúry porastu a priebehu počasia.

Sklon a orientácia svahu ovplyvňujú množstvo slnečného žiarenia, teplotu povrchu a dĺžku denného vysušovania. Južne až juhozápadne orientované svahy bývajú za porovnateľných podmienok viac oslnené, skutočný rozdiel však závisí od ročného obdobia, zatienenia, nadmorskej výšky a miestneho reliéfu.

Za referenčnú metódu stanovenia vlhkosti sa považuje gravimetrické meranie. Vzorka sa odoberie, bezprostredne uzavrie do nepriepustného obalu, odváži, vysuší pri stanovenej teplote do konštantnej hmotnosti a znovu odváži. Výhodou je priame stanovenie množstva vody, nevýhodou časová náročnosť a obmedzená priestorová reprezentativnosť.

Vzorky jemného paliva musia byť po odbere spracované rýchlo, pretože počas niekoľkých minút môžu meniť hmotnosť. Obal musí byť označený a nepriepustný pre vodnú paru. Pri živom palive treba zabrániť zahrievaniu vzorky na slnku a pokračovaniu transpirácie počas prepravy.

Na priebežné sledovanie odumretého paliva sa používajú štandardizované palivové tyčinky a elektronické snímače. Snímač poskytuje časový rad s vysokým rozlíšením, reprezentuje však konkrétny materiál a umiestnenie. Jeho hodnotu nemožno bez kalibrácie považovať za priamu vlhkosť všetkých druhov opadu, trávy alebo dreva v okolí.

Pri automatických snímačoch treba sledovať presnosť, rozsah merania, teplotnú závislosť, starnutie materiálu, tienenie a výšku nad povrchom. Referenčné gravimetrické odbery sú potrebné aj po inštalácii, aby sa overilo, ako dobre snímač zastupuje miestne palivo.

Priestorovo súvislé odhady vlhkosti odumretého paliva sa vytvárajú z meteorologických údajov, modelov rovnovážnej vlhkosti, zrážkových a sušiacich procesov a časových konštánt palivových tried. Kvalita výsledku závisí od priestorového rozlíšenia počasia a od schopnosti modelu zachytiť mikroklimu pod porastom.

Meteorologická stanica na otvorenom priestranstve môže poskytovať kvalitný údaj o regionálnom počasí, ale nemusí zachytiť teplotu, vlhkosť, vietor a zrážky pri povrchu v lese. Pri lokálnom hodnotení je preto vhodné kombinovať modelované údaje s meraniami v poraste.

Vlhkosť živého paliva sa odhaduje pomocou terénnych časových radov, vegetačných a vodných indexov, mikrovlnných údajov, pôdnej vlhkosti, meteorologických modelov a metód strojového učenia. Najnovšie prístupy kombinujú diaľkový prieskum Zeme, modely povrchu a fyziologické údaje. Ich prenositeľnosť medzi regiónmi a druhmi vegetácie však zostáva obmedzená, pretože rovnaký spektrálny signál môže vzniknúť rozdielnou kombináciou obsahu vody, množstva biomasy a štruktúry porastu.

Satelitné odhady poskytujú pravidelné priestorové pokrytie, ale zachytávajú prevažne signál hornej časti vegetácie. V lesnom poraste nemusia reprezentovať vlhkosť povrchového opadu, podrastu ani spodných

korunových častí. Hodnoty vlhkosti živého korunového paliva a jemného odumretého povrchového paliva preto musia zostať oddelenými údajovými vrstvami.

Pri hodnotení nebezpečenstva a rizika vzniku požiaru je rozhodujúca vlhkosť paliva, v ktorom môže pôsobiť iniciačný zdroj. V lesnom prostredí ide najčastejšie o jednohodinové odumreté povrchové palivo. V trávnatých a krovinných porastoch môže byť potrebné doplniť aj vlhkosť živých alebo sezónne odumierajúcich častí vegetácie.

Priestorová vrstva priemernej vlhkosti všetkého paliva by mohla skryť kritický stav jemnej iniciačnej zložky. Hrubé drevo môže zostať vlhké, zatiaľ čo povrchové ihličie alebo tráva už dosiahli nízku vlhkosť. Hodnotenie vzniku požiaru preto musí používať vlhkosť konkrétnej palivovej triedy, nie priemer z rôznych materiálov.

Riziko vzniku požiaru nevytvára nízka vlhkosť sama osebe. Potrebná je prítomnosť iniciačného zdroja a paliva, na ktoré môže pôsobiť. Nízka vlhkosť zvyšuje pravdepodobnosť úspešného zapálenia a následného udržania horenia, ale nenahrádza analýzu priestorového a časového výskytu iniciačných príčin.

Vlhkosť paliva je dynamický údaj a nemá sa ukladať ako nemenná vlastnosť palivového typu. Palivová mapa môže obsahovať relatívne stabilné údaje o druhu, množstve, veľkostnom zložení a priestorovej štruktúre paliva. Aktuálna vlhkosť musí byť pripojená ako časovo označená vrstva pravidelne aktualizovaná podľa meteorologických, senzorových, terénnych alebo diaľkovo snímaných údajov.

Pre každú hodnotu treba uviesť dátum a čas platnosti, druh paliva, časovú alebo veľkostnú triedu, spôsob stanovenia, priestorové rozlíšenie a mieru neistoty. Odporúča sa rozlišovať najmenej vlhkosť jednohodinového, desaťhodinového, stohodinového a tisícokhodinového odumretého paliva a vlhkosť vybraných skupín živého paliva.

Priestorové rozlíšenie výslednej vrstvy nesmie vytvárať dojem väčšej presnosti, než poskytujú vstupné údaje. Prevzorkovanie meteorologického modelu s kilometrovým rozlíšením na bunku 10 × 10 m nevytvára miestny údaj o vlhkosti paliva. Jemnejší raster možno použiť na technické spojenie vrstiev, jeho informačná podrobnosť však zostáva obmedzená pôvodným zdrojom.

Najspoľahlivejšie hodnotenie vzniká spojením viacerých zdrojov. Meteorologický model poskytuje priestorovú a časovú kontinuitu, automatické snímače zachytávajú miestnu dynamiku, gravimetrické odbery poskytujú referenčné hodnoty a diaľkový prieskum Zeme podporuje hodnotenie živej vegetácie na väčších územiach. Každý zdroj musí mať v geodatabáze uvedený pôvod a spôsob overenia.

Vlhkosť paliva je spojovacím prvkom medzi relatívne stabilnou palivovou mapou a aktuálnymi podmienkami vzniku a šírenia požiaru. Jej správne stanovenie umožňuje odlíšiť územie s vysokou zásobou paliva, ktoré je momentálne vlhké, od územia s menším množstvom, ale s kriticky suchým a súvislým jemným palivom. Pri hodnotení sa preto musí vždy interpretovať spolu s množstvom, druhom a kontinuitou paliva, meteorologickými podmienkami a prítomnosťou iniciačných zdrojov.

1.9. Prechod povrchového požiaru do korunového požiaru

Prechod povrchového požiaru do korunového požiaru nastáva vtedy, keď teplo uvoľňované horením povrchového a rebríkového paliva postačuje na zapálenie jemných palivových častí v korunách stromov.

Ide o zmenu správania už vzniknutého požiaru, nie o nový vznik požiaru. Tento proces preto charakterizuje potenciál vertikálneho rozvoja požiaru a nemá sa zamieňať s nebezpečenstvom alebo rizikom vzniku požiaru.

Podmienky prechodu závisia najmä od intenzity povrchového požiaru, vzdialenosti medzi povrchovou a korunovou vrstvou, prítomnosti rebríkového paliva a vlhkosti jemného korunového paliva. Po zapálení korún následne rozhoduje množstvo a priestorová spojitosť korunového paliva o tom, či zostane horenie obmedzené na jednotlivé stromy, alebo sa rozvinie aktívny korunový požiar (Van Wagner, 1977; Scott a Reinhardt, 2001; Cruz et al., 2004).

Povrchový požiar prenáša teplo ku korunovému palivu najmä prúdením horúcich plynov a sálaním. Pri priamom kontakte plameňa sa môže uplatniť aj bezprostredný prenos tepla na spodné vetvy, kry alebo mladé stromy. Korunové palivo sa musí najskôr zohriať, stratiť časť vody a následne začať uvoľňovať horľavé produkty tepelného rozkladu.

Schopnosť povrchového požiaru zapáliť koruny súvisí s jeho intenzitou. Intenzitu čela požiaru možno podľa Byrama (1959) vyjadriť vzťahom (13):

$$I = H \cdot w \cdot r \quad (13)$$

kde:

I – intenzita čela požiaru ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$)

H – efektívna výhrevnosť paliva ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

w – množstvo paliva spotrebovaného v aktívnej zóne horenia ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

r – rýchlosť šírenia požiaru ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Vysokú intenzitu podporuje najmä súvislá vrstva suchého jemného paliva, vyššia rýchlosť šírenia, vietor a sklon svahu. Význam má aj miestne nahromadenie vetiev, vrcholcov a ďalšieho materiálu po ťažbe alebo po poškodení lesného porastu.

Prechod do korún nemožno posudzovať iba podľa priemernej dĺžky plameňa. Vietor plamene nakláňa a mení smer tepelného pôsobenia, zatiaľ čo na svahu sa vyššie položené palivo dostáva bližšie k plameňom a horúcim plynom. Rovnaká intenzita povrchového požiaru preto môže mať v rozdielnych terénnych a veterných podmienkach odlišný účinok.

Výška korunovej bázy (CBH, z angl. Canopy Base Height) vyjadruje zvislú vzdialenosť od povrchu terénu po spodnú hranicu súvislej korunovej vrstvy schopnej podporovať horenie. Nižšia hodnota CBH spravidla znamená, že korunové palivo je vystavené tepelnému pôsobeniu povrchového požiaru pri nižšej intenzite. Vyššia hodnota vytvára väčšiu vzdialenosť, ktorú musí teplo alebo plameň prekonať.

CBH však nemožno určovať iba podľa najnižšej vetvy. Ojedinelá vetva nemusí vytvárať dostatočne súvislú palivovú vrstvu. Naopak, kry, prirodzené zmladenie, potlačené stromy a suché spodné vetvy môžu vytvoriť rebríkové palivo a funkčnú vzdialenosť ku korunám znížiť.

Pri viacvrstvových porastoch preto treba hodnotiť celý zvislý profil vegetácie. Súčasné postupy spracovania laserových údajov umožňujú identifikovať jednotlivé palivové vrstvy a medzery medzi nimi, čím poskytujú presnejší obraz o vertikálnom prepojení než jedna priemerná hodnota CBH (Viedma et al., 2024).

Jemné korunové palivo tvoria predovšetkým listy, ihličie, púčiky a tenké vetvičky. Práve tieto zložky sa pri zapálení korún najrýchlejšie zapájajú do plameňového horenia. Vyššia vlhkosť zvyšuje množstvo energie potrebné na ich vysušenie a zapálenie, zatiaľ čo pri nízkej vlhkosti sa čas do iniciácie skraca.

Vlhkosť jemného korunového paliva (FMC) závisí od dreviny, fenologickej fázy, dostupnosti pôdnej vody, zdravotného stavu stromov a trvania sucha. Rovnaká gravimetrická vlhkosť nemusí pri rôznych druhoch viesť k rovnakému správaniu, pretože význam má aj tvar ihličia alebo listov, hustota ich usporiadania a chemické zloženie.

Odumreté vetvičky a suché časti zachytené v korunách môžu mať výrazne nižšiu vlhkosť než živé palivo. Môžu sa preto zapáliť ako prvé a preniesť horenie na živú časť koruny.

Van Wagner (1977) vyjadril kritickú intenzitu povrchového požiaru potrebnú na zapálenie korunového paliva ako funkciu výšky korunovej bázy a vlhkosti jemného korunového paliva (14):

$$I_0 = [0.01 \cdot CBH \cdot (460 + 25.9 \cdot FMC)]^{3/2} \quad (14)$$

kde:

I_0 – kritická intenzita povrchového požiaru potrebná na zapálenie korunového paliva ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$)

CBH – výška korunovej bázy (m)

FMC – vlhkosť jemného korunového paliva (%)

Vzťah vyjadruje, že na zapálenie vyššie položeného alebo vlhkejšieho korunového paliva je potrebná vyššia intenzita povrchového požiaru. Pri nižšej CBH a nižšej FMC môže k iniciácii korunového horenia dôjsť pri nižšej intenzite.

Ide o modelové zjednodušenie. Vzťah priamo nezohľadňuje rebríkové palivo, viacvrstvovú štruktúru porastu, miestne nahromadenie suchých vetiev, smer vetra ani rozdiely medzi drevinami. Výsledok preto vyjadruje modelovú hranicu, nie presnú hodnotu platnú na každom mieste porastu.

Na porovnanie modelovanej intenzity povrchového požiaru s kritickou intenzitou možno použiť index možnosti prechodu (15):

$$TI = \frac{I_s}{I_0} \quad (15)$$

kde:

TI – index možnosti prechodu povrchového požiaru do korún,

I_s – modelovaná intenzita povrchového požiaru ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$)

I_0 – kritická intenzita potrebná na zapálenie korunového paliva ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$)

Pri hodnote $TI < 1$ modelovaná intenzita nedosahuje kritickú hranicu. Pri hodnote $TI \geq 1$ je zapálenie korunového paliva podľa použitého modelu možné. Index TI nevyjadruje riziko vzniku požiaru, ale iba možnosť vertikálneho prechodu už existujúceho povrchového požiaru.

Zapálenie korunového paliva môže mať rozdielny rozsah. Pri vzplanutí jednotlivej koruny horí jeden strom a požiar sa v korunovej vrstve ďalej nešíri. Pri pasívnom korunovom požiari sa postupne zapália jednotlivé stromy alebo skupiny stromov, pričom hlavný pohyb požiaru zostáva závislý od povrchovej

vrstvy. Pri aktívnom korunovom požiari sa horenie šíri súvislo povrchovým aj korunovým palivom (Van Wagner, 1977; Cruz a Alexander, 2014).

Samotné zasiahnutie korún preto nestačí na klasifikáciu požiaru ako aktívneho korunového. Pri dokumentovaní je potrebné uviesť, či išlo o jednotlivé vzplanutie, skupinové zapájanie korún alebo súvislé šírenie korunovou vrstvou.

Po zapálení korún sa musí horenie prenášať medzi susednými stromami dostatočne rýchlo, aby vznikol súvislý korunový front. Rozhodujúce sú horizontálna kontinuita korún, vietor a objemová hustota korunového paliva.

Objemová hustota korunového paliva (CBD, z angl. Canopy Bulk Density) vyjadruje suchú hmotnosť dostupného jemného korunového paliva pripadajúcu na jednotku objemu korunovej vrstvy. Uvádza sa v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Zahŕňa najmä listy, ihličie a jemné vetvičky, ktoré sa môžu aktívne zapojiť do plameňového horenia.

CBD možno vyjadriť vzťahom (16):

$$\text{CBD} = \frac{m_c}{V_c} \quad (16)$$

kde:

CBD – objemová hustota korunového paliva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

m_c – suchá hmotnosť dostupného jemného korunového paliva (kg)

V_c – objem korunovej vrstvy (m^3)

Vyššia hodnota CBD znamená, že jemné palivo je v korunovom priestore sústredené vo väčšom množstve a vzdialenosti medzi palivovými prvkami sú menšie. Tým sa vytvárajú priaznivejšie podmienky na prenos horenia. Pri nízkej CBD môžu horieť jednotlivé koruny, ale požiar sa nemusí udržať ako súvislý korunový front.

Van Wagner (1977) vyjadril kritickú rýchlosť šírenia potrebnú na udržanie aktívneho korunového požiaru (17)

$$R_0 = \frac{3}{\text{CBD}} \quad (17)$$

kde:

R_0 – kritická rýchlosť šírenia korunového požiaru ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Pri nižšej CBD je potrebná vyššia rýchlosť šírenia, aby sa oheň preniesol na susedné koruny skôr, než horiace palivo vyhorí. Podmienku aktívneho korunového požiaru možno vyjadriť indexom (18):

$$\text{AI} = \frac{R_c}{R_0} \quad (18)$$

kde:

AI – index aktivity korunového požiaru,

R_c – modelovaná rýchlosť šírenia korunového požiaru ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)

R_0 – kritická rýchlosť potrebná na udržanie aktívneho korunového požiaru ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Pri hodnote $AI < 1$ sa predpokladá skôr pasívne zapájanie jednotlivých korún. Pri hodnote $AI \geq 1$ modelované podmienky umožňujú aktívne šírenie korunovou vrstvou.

CBH a CBD majú v hodnotení rozdielnú funkciu. CBH súvisí predovšetkým s iniciáciou horenia korún, zatiaľ čo CBD sa viaže na udržanie aktívneho šírenia v korunovej vrstve. Nízka CBH sama osebe nezaručuje aktívny korunový požiar a vysoká CBD sama osebe neznamená, že sa koruny zapália.

CBD sa musí interpretovať spolu s horizontálnym usporiadaním korún. Dva porasty môžu mať podobnú priemernú objemovú hustotu, ale rozdielnú vzdialenosť medzi korunami. V súvislej alebo prekrývajúcej sa korunovej vrstve sa teplo a plameň prenášajú účinnejšie než medzi izolovanými skupinami stromov.

Korunová pokrývnosť alebo zápoj nemožno používať ako priamu náhradu CBD. Pokrývnosť vyjadruje plošné prekrytie územia korunami, zatiaľ čo CBD vyjadruje koncentráciu jemného paliva v objeme. Pre hodnotenie aktívneho korunového požiaru sú potrebné obidva druhy informácií.

Pri veľkých medzerách môže dôjsť iba k vzplanutiu jednotlivých stromov. Silný vietor, vysoká intenzita a prenos žeravých častíc však môžu umožniť prekonanie aj väčších vzdialeností, preto sa priestorová kontinuita nemá interpretovať bez meteorologického scenára.

Vietor zvyšuje rýchlosť povrchového požiaru, nakláňa plamene, podporuje prísun kyslíka a zlepšuje prenos tepla v smere šírenia. Po zapálení korún môže urýchľovať prenos horenia medzi stromami.

Rýchlosť vetra v poraste je spravidla nižšia než na otvorenom priestranstve. Jej zníženie závisí od výšky, zápoja a hustoty porastu. Pri modelovaní je preto potrebné používať rýchlosť vetra upravenú pre výšku a prostredie, v ktorom sa požiar šíri.

Pri intenzívnom horení sa môžu uvoľňovať horiace a žeravé častice kôry, vetiev alebo šišiek. Vietor ich môže preniesť pred hlavné čelo a založiť nové ohniská. Bodové požiare môžu následne vytvoriť ďalšie miesta prechodu do korún a viesť k nesúvislému, priestorovo komplikovanému rozvoju požiaru.

Poškodenie lesných porastov vetrom, snehom, suchom alebo podkôrnym hmyzom mení polohu a množstvo paliva. Bezprostredne po vetrovom alebo snehovom poškodení sa vetvy a koruny môžu premiestniť bližšie k povrchu a vytvoriť nové vertikálne prepojenia.

Po poškodení podkôrnym hmyzom môžu suché ihlice určitý čas zostať v korunách. Neskôr opadávajú a zvyšujú množstvo jemného povrchového paliva. Postupným lámaním vetiev a pádom kmeňov sa mení aj CBD, CBH a horizontálna kontinuita korún.

Poškodenie suchom môže znížiť vlhkosť živého korunového paliva a zvýšiť podiel odumretých častí. Výsledný vplyv závisí od toho, či jemné palivo zostáva v korunách, alebo sa už premiestnilo na povrch. Pri hodnotení je preto potrebné zaznamenať druh poškodenia, jeho rozsah a čas, ktorý od poškodenia uplynul.

Pri modelovaní prechodu povrchového požiaru do korún sa majú osobitne vyhodnotiť dve otázky:

- či intenzita povrchového požiaru postačuje na zapálenie korunového paliva,
- či po zapálení existujú podmienky na udržanie aktívneho korunového požiaru.

Na riešenie prvej otázky sa používajú najmä intenzita povrchového požiaru, CBH a FMC. Na druhú otázku sa používajú CBD, horizontálna kontinuita korún, vietor a modelovaná rýchlosť šírenia.

Výsledok sa nemá prezentovať ako presná predpoveď. Vhodnejšie je určiť triedu potenciálu prechodu a triedu potenciálu aktívneho korunového požiaru pre konkrétny palivový a meteorologický scenár.

Každý vstup musí mať uvedený pôvod, dátum platnosti a priestorové rozlíšenie. Priemerné porastové hodnoty CBH a CBD nemožno prevzorkovaním na jemnejší raster považovať za skutočné lokálne merania. Osobitne treba uviesť, či boli hodnoty zistené v teréne, odvodené z lesníckych údajov, vypočítané alometrickým modelom alebo získané z laserového skenovania.

Prechod povrchového požiaru do korunového požiaru je výsledkom postupného splnenia dvoch odlišných skupín podmienok. Najskôr musí povrchový požiar prekonať vertikálnu vzdialenosť ku korunám a zapáliť jemné korunové palivo. Následne musí byť korunové palivo dostatočne husté a priestorovo prepojené, aby sa horenie mohlo udržať a ďalej šíriť. Oddelené hodnotenie iniciácie a udržania korunového požiaru zabráňuje nesprávnej interpretácii modelových výsledkov.

1.10. Význam poznania paliva pre hodnotenie požiarneho rizika

Poznanie lesného paliva je nevyhnutným predpokladom hodnotenia rizika vzniku požiaru v lesnom prostredí. Palivo tvorí materiálny základ horenia, jeho prítomnosť však sama osebe neznamená, že na danom mieste požiar vznikne. Na vznik požiaru je potrebné súčasné pôsobenie iniciačného zdroja a paliva, ktoré je v danom čase schopné zapálenia a následného udržania horenia. Hodnotenie rizika vzniku požiaru preto musí prepájať informácie o palive s meteorologickými podmienkami, stavom vegetácie a priestorovým a časovým výskytom možných iniciačných zdrojov.

Význam paliva pri vzniku požiaru nemožno odvodiť iba z celkového množstva biomasy alebo zo zaradenia územia do určitého typu lesného porastu. Rozhodujúca je prítomnosť iniciačne významného paliva, predovšetkým jemných odumretých častí nachádzajúcich sa na povrchu pôdy. Suché ihličie, lístie, trávy, bylinné zvyšky a drobné vetvičky majú vysoký pomer povrchu k objemu, rýchlo reagujú na zmeny počasia a na ich zapálenie je potrebné menšie množstvo energie než pri hrubom drevnom palive. Pri hodnotení rizika vzniku požiaru má preto stav jemného povrchového paliva spravidla väčší význam než celková zásoba drevnej biomasy.

Palivové vlastnosti významné pre iniciáciu treba odlišovať od vlastností, ktoré ovplyvňujú správanie požiaru po jeho vzniku. Vlhkosť, množstvo a horizontálna kontinuita jemného povrchového paliva rozhodujú o tom, či sa počiatočné horenie udrží a prenesie na okolité palivové častice. Množstvo hrubého dreva, rebríkové palivo, výška korunovej bázy a objemová hustota korunového paliva ovplyvňujú najmä intenzitu, dĺžku horenia a možnosť vertikálneho rozvoja už existujúceho požiaru. Spojenie všetkých charakteristík do jedného nerozlíšeného ukazovateľa by preto miešalo podmienky vzniku požiaru s podmienkami jeho ďalšieho šírenia.

Lesné palivo sa mení na krátke vzdialenosti aj v rámci jedného porastu. Odlišné podmienky sa môžu vyskytovať pod zapojenou korunovou vrstvou, v porastových medzerách, na okraji lesa, pri komunikáciách, na rúbaniskách alebo na miestach poškodenia lesných porastov. Priemerná hodnota pre celý porast môže zakryť menšie plochy so súvislou vrstvou suchého jemného paliva, na ktorých je pravdepodobnosť úspešnej iniciácie vyššia.

Priestorová premenlivosť je významná aj vo vzťahu k iniciačným zdrojom. Palivovo priaznivé podmienky nemajú rovnaký význam vo všetkých častiach krajiny. Vyššie riziko vzniku požiaru môže vzniknúť tam,

kde sa suché a ľahko zapáliteľné palivo stretáva s častou prítomnosťou človeka, dopravou, rekreačnými aktivitami, spaľovaním zvyškov, poľnohospodárskymi činnosťami, prácami v lese alebo s technickou infraštruktúrou.

Priestorové hodnotenie preto musí zohľadňovať nielen palivové charakteristiky, ale aj pravdepodobnú prítomnosť iniciačného zdroja. Plocha s veľmi suchým jemným palivom, na ktorú človek takmer nevstupuje a na ktorej sa nenachádzajú technické zdroje iniciácie, má inú situáciu než rovnako suchá plocha pri ceste, turistickom chodníku, rekreačnom zariadení alebo zastavanom území.

Analýza požiarov na Slovensku za roky 2010 – 2025 poukázala na dominantné zastúpenie antropogénnych príčin. Meteorologické podmienky a stav paliva pôsobia predovšetkým ako činitele, ktoré určujú, či ľudská činnosť povedie iba ku krátkodobému lokálnemu horeniu, alebo k vzniku samostatne sa šíiaceho požiaru (Majlingová et al., 2026). Hodnotenie paliva preto nemá nahrádzať analýzu príčin vzniku požiarov, ale poskytovať jej materiálny a priestorový základ.

Riziko vzniku požiaru sa mení aj bez zmeny druhu alebo štruktúry lesného porastu. Dôvodom je najmä dynamika vlhkosti jemného paliva. Po daždi môže byť palivo na určitom území dočasne ťažko zapáliteľné, zatiaľ čo po niekoľkých hodinách alebo dňoch slnečného a veterného počasia môže jeho vlhkosť klesnúť na úroveň umožňujúcu iniciáciu a ďalšie šírenie horenia.

Táto dynamika je osobitne výrazná na začiatku jari. Minuloročná tráva, bylinné zvyšky, ihličie a lístie môžu po roztopení snehu rýchlo vyschnúť, hoci pôda a hrubšie palivové zložky zostávajú vlhké. Priestor môže preto vykazovať vysoké riziko vzniku povrchového požiaru aj bez dlhodobého pôdneho alebo hydrologického sucha.

Počas dlhšieho obdobia bez zrážok sa postupne vysušujú aj hrubšie palivové častice, organické pôdne vrstvy a živá vegetácia. Mení sa tak nielen riziko vzniku požiaru, ale aj potenciál jeho intenzívneho a dlhotrvajúceho priebehu. Krátkodobú vlhkosť jemného povrchového paliva preto treba odlišovať od dlhodobého vysušenia celého palivového komplexu.

Aktuálne palivové podmienky nemožno spoľahlivo vyjadrovať iba statickou mapou typu vegetácie. Palivová mapa má poskytovať relatívne stabilné údaje o druhu, množstve, rozmerovom zložení a priestorovej štruktúre paliva. Dynamické údaje, najmä vlhkosť paliva, sa musia pripájať ako pravidelne aktualizované časové vrstvy. Moderné systémy hodnotenia nebezpečenstva vzniku požiaru preto odlišujú jednotlivé triedy odumretého paliva a živú vegetáciu podľa ich rozdielnej časovej odozvy.

Zaradenie plochy do palivového typu alebo palivového modelu predstavuje zjednodušenie reálneho palivového komplexu. Palivový model opisuje vlastnosti významné pre konkrétny výpočtový postup, nie všetky vlastnosti vegetácie a biomasy. Pri hodnotení rizika vzniku požiaru je dôležité, aby použitá klasifikácia primerane vystihovala iniciačne významné palivo.

Súčasný výskumy ukazujú, že všeobecné palivové typy nemusia vždy zodpovedať skutočnej štruktúre a druhovému zloženiu porastov zistenému v teréne. Baron et al. (2024) zaznamenali výrazné rozdiely medzi terénne zistenou štruktúrou lesných porastov a ich zaradením v používaných palivových klasifikáciách. Takýto nesúlad môže viesť k nesprávnemu odhadu palivových podmienok a následne aj k nepresnej interpretácii výsledkov modelovania.

Palivové mapy preto vyžadujú terénne overenie a pravidelnú aktualizáciu. Osobitná aktualizácia je potrebná po ťažbe, po vetrovom alebo snehovom poškodení lesa, po poškodení podkôrnym hmyzom, po požiari alebo po preventívnom zásahu. Takéto udalosti môžu v krátkom čase zmeniť množstvo, polohu a spojitosť paliva natoľko, že pôvodné zaradenie prestane zodpovedať skutočnému stavu.

Pri hodnotení rizika vzniku požiaru nie sú všetky palivové charakteristiky rovnocenné. Ich význam závisí od sledovaného procesu. Pre iniciáciu a počiatočné udržanie horenia sú rozhodujúce najmä:

- prítomnosť jemného odumretého paliva,
- jeho aktuálna vlhkosť,
- plošné množstvo iniciačne významnej zložky,
- horizontálna kontinuita palivového lôžka,
- hĺbka a objemová hustota vrstvy,
- zatienenie a miestne podmienky vysušovania,
- kontakt paliva s predpokladaným iniciačným zdrojom.

Charakteristiky rebríkového a korunového paliva sa do hodnotenia zapájajú pri určovaní potenciálu ďalšieho rozvoja požiaru. Výška korunovej bázy, objemová hustota korunového paliva a horizontálna kontinuita korún neposkytujú priamu informáciu o tom, či požiar na danom mieste vznikne. Vyjadrujú, ako sa už vzniknutý požiar môže preniesť do vyšších vrstiev a či sa v nich môže ďalej šíriť.

Podobne ani vysoké celkové množstvo paliva neznamena automaticky vysoké riziko vzniku požiaru. Veľké množstvo vlhkého hrubého dreva môže mať menší význam pre iniciáciu než tenká, ale súvislá vrstva suchej trávy alebo ihličia. Celkové množstvo paliva je významnejšie pri hodnotení množstva energie, ktoré sa môže pri rozvinutom požiari uvoľniť, a pri odhade dĺžky horenia a náročnosti dohášania.

Samostatná mapa paliva nie je mapou rizika vzniku požiaru. Predstavuje jednu zo vstupných vrstiev, ktorú treba prepojiť s aktuálnymi meteorologickými podmienkami a s údajmi o iniciačných zdrojoch. Podľa účelu hodnotenia možno doplniť aj topografické, pôdne, hydrologické a porastové údaje.

Meteorologické vstupy určujú najmä aktuálnu vlhkosť paliva a rýchlosť jeho vysušovania. Teplota, relatívna vlhkosť vzduchu, deficit tlaku vodnej pary, zrážky, slnečné žiarenie a vietor menia stav jemného paliva v priebehu hodín až dní. Pôdna vlhkosť a dlhodobější vodná bilancia majú väčší význam pri živom palive, hrubších drevných častiach a podpovrchových organických vrstvách.

Topografia ovplyvňuje oslnenie, miestne prúdenie vzduchu a vysušovanie paliva. Južne a juhozápadne orientované svahy môžu byť pri porovnateľných podmienkach teplejšie a suchšie než zatienené polohy. Tento vzťah však nemožno zovšeobecniť bez zohľadnenia zápoja, nadmorskej výšky, tvaru reliéfu a miestnej mikroklimy.

Údaje o iniciačných zdrojoch môžu zahŕňať hustotu a typ cestnej siete, turistické trasy, rekreačné areály, osídlenie, lesnícke a poľnohospodárske činnosti, elektrické vedenia, železnice a priestorové rozloženie historicky evidovaných príčin požiarov. Historické požiare však nemajú byť jediným podkladom, pretože ich evidencia môže byť neúplná a priestorové súradnice nemusia vždy zodpovedať presnému miestu iniciácie.

Výsledok hodnotenia závisí od mierky vstupných údajov. Vlhosť jemného paliva sa môže meniť na krátke vzdialenosti, zatiaľ čo meteorologické modely alebo lesnícke databázy často poskytujú údaje

pre podstatne väčšie priestorové jednotky. Zjednotenie technickej veľkosti rastrových buniek neodstraňuje rozdiely v skutočnej informačnej podrobnosti.

Prevzorkovanie meteorologických údajov s kilometrovým rozlíšením na bunku 10×10 m nevytvára miestny údaj o vlhkosti paliva. Rovnako rozdelenie priemerného porastového množstva paliva do jemného rastra neznamená, že dané množstvo bolo zistené v každej bunke samostatne. Pri interpretácii je preto potrebné uvádzať pôvodné rozlíšenie vstupov, spôsob priestorového odvodenia a mieru neistoty.

Najnovšie prehľady mapovania paliva poukazujú na rýchly rozvoj multispektrálnych, radarových a laserových údajov, fotogrametrie a metód umelej inteligencie. Zároveň však zdôrazňujú, že kvalitu výstupov naďalej obmedzuje nedostatok reprezentatívnych terénnych údajov, rozdielna miera vstupov a obmedzená prenositeľnosť modelov medzi regiónmi a typmi vegetácie (Shaik et al., 2025).

Lesné palivo je dynamickou zložkou prostredia. Jeho množstvo a usporiadanie sa menia rastom vegetácie, opadom, rozkladom, hospodárskymi zásahmi a poškodením lesných porastov. Vlhkosť sa mení ešte rýchlejšie, často v priebehu hodín. Každý údaj o palive preto musí obsahovať časovú informáciu a interval, počas ktorého ho možno považovať za použiteľný.

Relatívne stabilné vlastnosti, napríklad typ opadu, priemerná hĺbka palivovej vrstvy alebo základná štruktúra porastu, možno aktualizovať v dlhších intervaloch alebo po významnej zmene porastu. Dynamické vlastnosti, najmä vlhkosť jemného paliva, vyžadujú dennú alebo kratšiu aktualizáciu podľa účelu systému.

Pri výslednom hodnotení treba rozlišovať priamo merané, modelované a klasifikačne priradené údaje. Priamo meraná vlhkosť na konkrétnom mieste má inú výpovednú hodnotu než regionálny odhad z meteorologického modelu. Rovnako množstvo paliva namerané v teréne má inú mieru neistoty než hodnota mu priradená podľa typu porastu.

Výsledok zaradenia územia do vysokej triedy rizika vzniku požiaru môže mať rozdielnú mieru neistoty v závislosti od kvality, aktuálnosti a priestorovej podpory vstupných údajov. Zaradenie založené na aktuálnych terénnych a senzorových údajoch je spravidla lepšie dátovo podložené než zaradenie odvodené zo starších porastových údajov a meteorologických údajov s nižšou priestorovou podrobnosťou.

Poznanie palivových podmienok umožňuje identifikovať miesta, na ktorých sa iniciačné zdroje stretávajú so suchým a priestorovo súvislým palivom. Takéto územia možno uprednostniť pri preventívnych kontrolách, obmedzení rizikových činností, informovaní verejnosti, rozmiestňovaní hliadok a sledovaní aktuálneho stavu vegetácie.

Palivové údaje zároveň umožňujú rozlišovať opatrenia zamerané na obmedzenie vzniku požiaru od opatrení zameraných na zmiernenie jeho ďalšieho správania. Odstránenie jemného paliva v okolí frekventovaných iniciačných miest môže znižovať možnosť, že počiatočné zapálenie prerastie do šíiaceho sa požiaru. Redukcia rebríkového a korunového paliva ovplyvňuje najmä potenciál vertikálneho prechodu a intenzívneho korunového horenia.

Účinné preventívne plánovanie preto nemá vychádzať z jednej všeobecnej mapy. Potrebné je oddelene zobrazit' palivové podmienky významné pre iniciáciu, aktuálnu vlhkosť paliva, výskyt iniciačných zdrojov

a charakteristiky ovplyvňujúce potenciálne správanie požiaru. Ich následná interpretácia poskytuje podklad na určenie miestnych priorít a výber primeraného typu opatrenia.

Poznanie vlastností lesného paliva vytvára obsahový základ ďalších metodických častí monografie. Mapovanie nemá zachytávať iba všeobecný vegetačný kry, ale palivové charakteristiky viazané na konkrétny účel hodnotenia. Pri riziku vzniku požiaru je potrebné identifikovať predovšetkým jemné iniciačne významné palivo a jeho aktuálny stav. Pri modelovaní správania požiaru sa dopĺňajú parametre povrchovej, rebríkovej a korunovej vrstvy.

Súčasná metóda umožňuje prepájať terénne zisťovanie s údajmi diaľkového prieskumu Zeme, lesníckymi databázami, meteorologickými modelmi a priestorovou analýzou iniciačných zdrojov. Technologický rozvoj však nenesie základnú požiadavku, aby každá odvodená vrstva mala jasne definovaný význam a bola overená voči skutočným palivovým podmienkam.

Hodnotenie rizika vzniku požiaru musí byť preto založené na účelovo vybraných, časovo platných a priestorovo primeraných údajoch o palive. Celková biomasa, palivový typ alebo jeden všeobecný index nemôžu samostatne vyjadriť všetky podmienky vzniku a ďalšieho priebehu požiaru. Spoľahlivý postup musí rozlišovať palivo významné pre iniciáciu, palivo riadiace povrchové šírenie a palivo podmieňujúce vertikálny a korunový rozvoj požiaru. Takéto členenie umožňuje správne interpretovať výsledky, vyhnúť sa duplicitě ukazovateľov a vytvoriť odborný základ na mapovanie lesného paliva v podmienkach Slovenskej republiky.

2. METODICKÝ RÁMEC MAPOVANIA PALIVA V LESOCH SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Mapovanie lesného paliva predstavuje systematický proces identifikácie, priestorového vymedzenia, kvantifikácie a klasifikácie palivových zložiek, ktoré ovplyvňujú vznik a ďalšie správanie požiaru v lesnom prostredí. Jeho výsledkom nemá byť iba mapa vegetačného krytu alebo drevinového zloženia, ale súbor priestorových údajov opisujúcich druh, množstvo, štruktúru, polohu a spojitosť paliva. Osobitne je potrebné rozlišovať povrchové, rebríkové a korunové palivo, pretože každá z týchto vrstiev plní pri požiari inú funkciu a vyžaduje odlišné metódy zisťovania a priestorového spracovania (Keane, 2015; Gale et al., 2021; Abdollahi a Yebra, 2023).

Lesnícke údaje poskytujú významné informácie o drevinovom zložení, veku, zakmenení, výške, zásobe a hospodárskom stave porastov, nie sú však priamym meraním lesného paliva. Rovnaký typ porastu môže mať rozdielnu vrstvu opadu, množstvo ležiaceho dreva, hustotu bylinného a krovínového podrastu alebo vertikálne prepojenie medzi povrchom a korunami. Výsledky terénnych porovnaní zároveň ukazujú, že všeobecné palivové typy nemusia vždy primerane vystihovať skutočnú štruktúru a zloženie paliva, najmä v zmiešaných porastoch, na plochách po ťažbe a v lesoch s výrazne premenlivou porastovou štruktúrou (Baron et al., 2024).

Metodický rámec mapovania preto vychádza z kombinácie priameho terénneho zisťovania, existujúcich lesníckych a environmentálnych databáz, údajov diaľkového prieskumu Zeme a priestorového modelovania. Terénne merania poskytujú referenčné údaje o skutočnom množstve a usporiadaní paliva. Lesnícke údaje umožňujú priestorovo vymedziť porasty a opísať ich základné vlastnosti. Optické, radarové a laserové údaje podporujú odvodenie priestorovo súvislých charakteristík vegetácie. Geografické informačné systémy umožňujú tieto zdroje zosúladiť, klasifikovať a spracovať do jednotných mapových a databázových výstupov.

Žiadny jednotlivý zdroj údajov nedokáže spoľahlivo zachytiť celý palivový komplex. Optické snímky poskytujú informácie najmä o spektrálnych vlastnostiach a plošnom rozložení vegetácie, ale ich schopnosť zachytiť palivo pod zapojenou korunovou vrstvou je obmedzená. Radarové údaje reagujú na štruktúru a obsah vody vo vegetácii, ich interpretácia však závisí od vlnovej dĺžky, geometrie snímania a vlastností porastu. Laserové skenovanie poskytuje trojrozmerné informácie o výške, hustote a vertikálnom rozložení vegetácie, pričom citlivosť jednotlivých platforiem na spodné palivové vrstvy sa líši (Gale et al., 2021; Abdollahi a Yebra, 2025).

Pozemné a mobilné laserové skenovanie dokáže podrobne zachytiť kroviny, tráv, ležiace drevo, opad a ďalšie palivové vrstvy pri povrchu. Letecké laserové skenovanie je vhodnejšie na plošne rozsiahle hodnotenie výšky porastu, korunovej pokrývnosti a vertikálnej štruktúry korún, jeho citlivosť na palivo pri povrchu však môže byť v hustých porastoch znížená tienením hornou korunovou vrstvou. Z uvedeného dôvodu je potrebné zdroj údajov vyberať podľa palivovej vrstvy, ktorá je predmetom mapovania, a nie iba podľa deklarovaného priestorového rozlíšenia senzora.

Súčasný mapovanie paliva čoraz viac využíva metódy strojového učenia a umelej inteligencie. Tieto postupy umožňujú spracovať veľké množstvo spektrálnych, priestorových a štruktúrnych premenných a vytvárať klasifikačné alebo regresné modely pre rozsiahle územia. Ich presnosť však závisí od kvality referenčných terénnych údajov, reprezentatívnosti tréningových vzoriek a podobnosti podmienok,

v ktorých bol model vytvorený a následne použitý. Model úspešný v jednom type vegetácie alebo regióne nemožno bez overenia automaticky preniesť do lesov Slovenska (Shaik et al., 2025; Abdollahi a Yebra, 2025).

Pri mapovaní paliva treba dôsledne rozlišovať palivový komponent, palivovú vrstvu, palivový typ a palivový model. Palivový komponent predstavuje konkrétnu zložku, napríklad ihličie, listový opad, suchú trávu, kroviny alebo ležiace drevo. Palivová vrstva vyjadruje jej polohu v podpovrchovej, povrchovej, rebríkovej alebo korunovej časti porastu. Palivový typ je opisná kategória založená na dominantnom zložení a štruktúre paliva. Palivový model je účelovo zjednodušený súbor parametrov určený na modelovanie konkrétnych charakteristík správania požiaru. Ich vzájomné zamieňanie by viedlo k nesprávnej interpretácii mapových výstupov.

Metodika musí zároveň oddeliť relatívne stabilné a dynamické vlastnosti paliva. Druh palivovej zložky, veľkostné zastúpenie, priemerné množstvo paliva, hĺbka vrstvy a základná porastová štruktúra sa menia pomalšie a môžu byť súčasťou základnej palivovej mapy. Vlhkosť jemného paliva, stav živej vegetácie a dostupnosť paliva pre zapálenie sa menia v priebehu hodín, dní alebo vegetačnej sezóny. Musia sa preto spracúvať ako samostatné, časovo označené a pravidelne aktualizované vrstvy. Statická mapa paliva sama osebe nemôže vyjadrovať aktuálne nebezpečenstvo vzniku požiaru.

Základnou priestorovou jednotkou hodnotenia v podmienkach lesného hospodárstva Slovenskej republiky je JPRL. Jej využitie umožňuje prepojiť výsledky mapovania s údajmi hospodárskej úpravy lesov a s praktickým plánovaním opatrení. Vnútna premenlivosť paliva však často presahuje možnosti jednej priemernej hodnoty priradenej celej JPRL. Podrobné spracovanie preto vyžaduje rastrové alebo objektovo orientované hodnotenie a následnú agregáciu výsledkov na úroveň JPRL.

Pri agregácii nemá byť výsledok obmedzený iba na aritmetický priemer. Vhodné je evidovať medián, horné kvantily, maximálnu hodnotu, podiel plochy vo vyšších triedach a dominantný palivový typ. Priemer môže zakryť menšie plochy so súvislým jemným palivom, výrazným rebríkovým prepojením alebo vysokou koncentráciou korunového paliva. Takéto miesta môžu mať pre vznik alebo ďalší rozvoj požiaru väčší význam než len priemerný stav celej jednotky.

Priestorové rozlíšenie výstupu musí zodpovedať skutočnej informačnej podrobnosti vstupných údajov. Výsledný raster s bunkou 10 × 10 m možno vytvoriť ako jednotný technický rámec, nemožno však predpokladať, že všetky jeho hodnoty boli zistené s desaťmetrovou presnosťou. Prezorkovanie porastového údajja, klimatekvej vrstvy alebo družicového produktu do jemnejšej mriežky nezvyšuje množstvo pôvodnej informácie. Pri každom výstupe sa preto musí uchovávať údaj o pôvodnom rozlíšení, metóde odvodenia a miere priestorovej neistoty.

Osobitnú pozornosť si vyžaduje časová platnosť mapových vrstiev. Lesné palivo sa mení vplyvom rastu a odumierania vegetácie, opadu, rozkladu, ťažby, preventívnych opatrení, požiarov a poškodenia lesných porastov vetrom, snehom, suchom alebo podkôrnym hmyzom. Palivové mapy sa preto nemajú aktualizovať iba v pevne stanovených intervaloch, ale aj po udalostiach, ktoré významne zmenili množstvo alebo priestorové usporiadanie paliva. Súčasné veľkoplošné systémy mapovania paliva už využívajú pravidelnú detekciu zmien a sezónne produkty odvodené z harmonizovaných družicových údajov.

Každá výsledná vrstva musí byť doplnená metadátami. Tie majú obsahovať názov a význam ukazovateľa, jednotku, zdroj údajov, dátum alebo obdobie platnosti, pôvodné a výstupné priestorové rozlíšenie, použitú metódu, spôsob terénneho overenia a vyjadrenie neistoty. Rovnako dôležité je rozlišovať, či hodnota vznikla priamym meraním, výpočtom, klasifikačným priradením, interpoláciou alebo predikčným modelom.

Overenie mapových výstupov musí byť oddelené od údajov použitých na vytvorenie modelu. Výsledky sa majú kontrolovať na nezávislých terénnych plochách a osobitne hodnotiť pre jednotlivé palivové vrstvy a kategórie. Celková presnosť môže zakryť systematické chyby pri menej zastúpených, ale požiarne významných triedach. Okrem celkovej úspešnosti klasifikácie je preto potrebné hodnotiť chyby opomenutia a nesprávneho zaradenia, presnosť jednotlivých tried a pri spojitých premenných aj veľkosť a priestorové rozloženie odchýlok.

Výstupom metodického rámca nie je jedna univerzálna mapa, ale vzájomne prepojený súbor vrstiev. Má zahŕňať najmenej povrchové palivové komponenty, množstvo paliva, veľkostné triedy odumretého dreva, bylinnú a krovinovú vegetáciu, rebríkové palivo, výšku korunovej bázy, korunovú pokrývnosť a objemovú hustotu korunového paliva. Dynamické vrstvy vlhkosti sa pripájajú podľa konkrétneho dátumu alebo scenára.

Takto koncipovaný metodický rámec vytvára základ na následné terénne zisťovanie, tvorbu geodatabázy a odvodenie palivových modelov pre lesné prostredie Slovenskej republiky. Jeho úlohou nie je nahradiť terénne merania diaľkovým prieskumom Zeme ani mechanicky preberať zahraničné klasifikácie. Cieľom je spojiť dostupné zdroje údajov do transparentného, opakovateľného a overiteľného postupu, ktorý rešpektuje priestorovú premenlivosť slovenských lesov a umožňuje odborne oddeliť palivové podmienky významné pre vznik požiaru od vlastností ovplyvňujúcich jeho ďalšie správanie.

2.1. Východiská mapovania lesného paliva

Mapovanie lesného paliva vychádza z potreby priestorovo zachytiť tie vlastnosti organického materiálu v lesnom prostredí, ktoré ovplyvňujú vznik požiaru a jeho ďalšie správanie. Nejde preto iba o kartografické zobrazenie vegetácie, drevinového zloženia alebo spôsobu využívania územia. Výsledkom má byť priestorovo usporiadaný súbor údajov o druhu, množstve, veľkostnom zložení, vlhkosti, polohe a kontinuite paliva, ktorý možno použiť pri hodnotení rizika vzniku požiaru, modelovaní jeho šírenia a plánovaní preventívnych opatrení.

Základným východiskom je rozlíšenie medzi vegetáciou, biomasou a lesným palivom. Vegetačná alebo lesnícka mapa opisuje prevažne druhové zloženie, priestorové rozšírenie a základnú štruktúru porastu. Údaj o biomase vyjadruje množstvo živej alebo odumretej organickej hmoty. Palivová mapa sa musí zamerať na tú časť biomasy, ktorá sa za určitých podmienok môže zapáliť, podporovať ďalšie horenie alebo ovplyvniť intenzitu a spôsob šírenia požiaru. Jednoduché prevedenie kategórií krajinej pokrývky na palivové modely preto nemusí správne zachytiť skutočné palivové podmienky. Novšie postupy mapovania zdôrazňujú potrebu miestne prispôbovaných prevodných pravidiel a terénneho overenia výsledných palivových tried.

Rovnaké drevinové zloženie nemusí znamenať rovnaký palivový komplex. Porasty sa môžu odlišovať množstvom opadu, hrúbkou hrabanky, zastúpením trávy a krovín, množstvom ležiaceho dreva, výškou korunovej bázy, objemovou hustotou korunového paliva a mierou horizontálneho a vertikálneho

prepojenia jednotlivých vrstiev. Palivové charakteristiky ovplyvňuje vek a vývojové štádium porastu, zakmenenie, hospodárske zásahy, prirodzené odumieranie stromov aj poškodenie lesných porastov vetrom, snehom, suchom alebo podkôrnym hmyzom. Mapovanie preto nemôže byť založené iba na názve dreviny, lesnom type alebo kategórii využitia územia.

Ďalším východiskom je funkčné členenie paliva podľa jeho úlohy pri požiari. Pri hodnotení rizika vzniku požiaru je rozhodujúce najmä jemné povrchové palivo, v ktorom môže dôjsť k iniciácii a udržaniu počiatočného horenia. Pri modelovaní povrchového šírenia sa dopĺňa jeho množstvo, veľkostné zloženie, hĺbka a kontinuita palivovej vrstvy. Pri hodnotení možného prechodu do korún sa sleduje rebríkové palivo, výška korunovej bázy a vlhkosť jemného korunového paliva. Objemová hustota a horizontálna kontinuita korún sa uplatňujú najmä pri posudzovaní možnosti udržania aktívneho korunového požiaru. Jednotlivé palivové vrstvy preto nemožno spojiť do jedného všeobecného ukazovateľa bez straty ich rozdielneho významu.

Mapovanie musí rozlišovať aj relatívne stabilné a dynamické palivové charakteristiky. Medzi pomalšie sa meniace vlastnosti patria druh paliva, základná štruktúra porastu, priemerné množstvo paliva, rozdelenie do veľkostných tried, hĺbka palivovej vrstvy a niektoré charakteristiky korún. Vlhkosť jemného odumretého paliva, stav živej vegetácie a aktuálna dostupnosť paliva pre zapálenie sa môžu meniť v priebehu hodín alebo dní. Dynamické charakteristiky preto nemajú byť uložené ako trvalý atribút palivového typu, ale ako samostatné časovo označené vrstvy pravidelne aktualizované podľa terénnych, meteorologických, senzorových alebo diaľkovo snímaných údajov.

Z uvedeného vyplýva, že statická palivová mapa sama osebe nevyjadruje aktuálne riziko vzniku požiaru. Poskytuje priestorovú informáciu o tom, kde sa jednotlivé typy a vrstvy paliva nachádzajú a aké majú relatívne stabilné vlastnosti. Na hodnotenie aktuálnej možnosti zapálenia sa musí doplniť o vlhkosť iniciačne významného paliva, meteorologické podmienky a údaje o možných iniciačných zdrojoch. Na modelovanie ďalšieho správania už vzniknutého požiaru sa dopĺňajú vietor, sklon svahu a podrobnejšie parametre povrchového a korunového paliva.

Spôľahlivé mapovanie lesného paliva musí prepájať priame terénne zisťovanie s priestorovými údajmi. Terénne meranie poskytuje referenčné hodnoty množstva, druhu a usporiadania paliva, jeho rozsah je však obmedzený počtom skúšobných plôch, dostupnosťou územia a časovou náročnosťou. Diaľkový prieskum Zeme umožňuje získať priestorovo súvislé údaje pre rozsiahle územia, ale mnohé palivové charakteristiky meria iba nepriamo. Najmä povrchové palivo môže byť v zapojených porastoch zakryté korunovou vrstvou a jeho odhad zostáva neistý. V súčasnosti sa preto odporúča kombinovať terénne merania, optické a radarové údaje, laserové skenovanie a predikčné modely.

Terénne údaje majú pri mapovaní tri základné úlohy. Prvou je vytvorenie opisných a kvantitatívnych charakteristík paliva v jednotlivých typoch lesných porastov. Druhou je kalibrácia vzťahov medzi meranými palivovými parametrami a premennými odvodenými z lesníckych databáz alebo diaľkového prieskumu Zeme. Treťou je nezávislé overenie správnosti výsledných klasifikačných a predikčných modelov.

Kalibračné a overovacie údaje musia byť oddelené. Použitie rovnakých terénnych plôch na vytvorenie aj posúdenie modelu môže viesť k nadhodnoteniu jeho presnosti. Overovacie plochy majú reprezentovať rozdielne drevinové zloženie, vekové stupne, stanovištné podmienky, hustotu porastu, mieru poškodenia lesných porastov a spôsob obhospodarovania. Potrebne je zachytiť aj menej časté, ale z hľadiska požiaru

významné palivové situácie, napríklad plochy s vysokým množstvom jemného drevného materiálu alebo výrazným rebríkovým palivom.

Aktuálne výskumy ukazujú, že diaľkovo snímané odhady jednotlivých povrchových zložiek nemajú rovnakú spoľahlivosť. Modelované správanie požiaru môže byť zvlášť citlivé na chyby v odhade množstva opadu a krovínového paliva. Pri týchto zložkách je preto potrebný vyšší počet terénnych meraní a dôslednejšie miestne overenie modelov.

Lesné palivo sa vyskytuje v niekoľkých priestorových vrstvách a jeho mapovanie musí tejto skutočnosti zodpovedať. Povrchové palivo zahŕňa opad, hrabanku, bylennú vegetáciu, kroviny a ležiaci drevný materiál. Rebríkové palivo tvoria vegetačné prvky prepájajúce povrch s korunami. Korunové palivo sa opisuje najmä výškou korunovej bázy, korunovou pokryvnosťou, hĺbkou korún a objemovou hustotou dostupného jemného paliva.

Jednotlivé vrstvy vyžadujú rozdielne zdroje údajov. Optické družicové snímky poskytujú informáciu o spektrálnych vlastnostiach vegetácie a o jej plošnom rozložení. Radarové údaje reagujú na štruktúru a obsah vody vo vegetácii. Letecké laserové skenovanie umožňuje odvodiť výšku porastu, korunovú štruktúru a vertikálne rozdelenie vegetácie. Pozemné a mobilné laserové skenovanie poskytuje podrobnejšie údaje o podrastových vrstvách, kmeňoch, vetvách a palive v blízkosti povrchu. Porovnania súčasných laserových platforiem potvrdzujú, že pozemné a mobilné skenovanie môže podrobnejšie zachytiť palivo v nižších vegetačných vrstvách, zatiaľ čo letecké skenovanie je vhodné na rozsiahlejšie mapovanie korunových charakteristík.

Priestorové údaje sa preto nemajú vyberať iba podľa veľkosti obrazovej alebo rastrovej bunky. Rozhodujúce je, na ktorú palivovú vrstvu je senzor citlivý, akú hustotu a kvalitu pozorovaní poskytuje a do akej miery je výsledná charakteristika overiteľná v teréne. Jemné deklarované rozlíšenie snímky nemusí znamenať, že senzor dokáže zachytiť palivo ukryté pod korunovou vrstvou.

Novšie európske výskumy preukazujú možnosť kombinovať viacero senzorov pri mapovaní plošného množstva korunového paliva a jeho objemovej hustoty vo veľkom územnom rozsahu. Takéto výstupy sú významné pri regionálnom hodnotení, zostávajú však odvodenými modelovými produktmi a pri použití v podmienkach Slovenska vyžadujú overenie na domácich terénnych údajoch.

Palivové charakteristiky sa menia na rôznych priestorových úrovniach, od jednotlivých palivových častíc, napríklad ihlíc, listov, stebiel alebo vetvičiek, cez palivovú vrstvu a terénnu plochu až po lesný porast a krajinu. Mierka mapovania sa preto musí odvíjať od účelu výstupu. Pri podrobnom modelovaní správania požiaru môže byť potrebný priestorový opis paliva v jemnom rastru alebo v trojrozmernom modeli, zatiaľ čo pri regionálnom plánovaní môže postačovať všeobecnejšie členenie na palivové typy a triedy (Keane, 2015).

V podmienkach lesného hospodárstva Slovenskej republiky je významnou priestorovou jednotkou už spomínaná JPRL. Umožňuje prepájať výsledky s existujúcimi lesníckymi údajmi a s plánovaním hospodárskych a preventívnych opatrení. Palivo však môže byť v rámci jednej jednotky výrazne premenlivé. Priemerná hodnota priradená celej ploche nemusí zachytiť porastové medzery, okraje lesa, miestne nahromadenie ležiaceho dreva, husté zmladenie ani plochy po poškodení lesných porastov (Prichard et al. 2023).

Základné spracovanie je preto vhodné uskutočniť v rastrovom alebo objektovo orientovanom priestorovom modeli a až následne výsledky agregovať na úroveň JPRL.

Priestorové rozlíšenie výslednej mapy musí zodpovedať skutočnej informačnej podrobnosti vstupných údajov. Raster s bunkou 10×10 m môže slúžiť ako jednotný technický rámec na spracovanie vrstiev, neznamená však, že všetky hodnoty boli zmerané alebo odvodené s desaťmetrovou presnosťou. Prevezorkovanie porastového alebo klimatického údaja do jemnejšej mriežky nevytvára nové informácie.

Mapovanie paliva musí obsahovať aj časový rozmer. Povrchové a korunové palivo sa mení rastom vegetácie, opadom, rozkladom, ťažbou, preventívnymi zásahmi, požiarom a poškodením lesných porastov. Jednotlivé zložky majú rozdielnu rýchlosť zmeny. Bylinné palivo sa môže podstatne zmeniť počas jedného vegetačného obdobia, jemný opad sa obnovuje každoročne a hrubé ležiace drevo môže v poraste pretrvávať desiatky rokov.

Aktualizácia palivovej mapy preto nemá byť založená iba na pravidelnom pevnom intervale. Mimoriadna aktualizácia je potrebná po udalostiach, ktoré výrazne zmenia množstvo alebo polohu paliva, napríklad po rozsiahlejšej ťažbe, vetrovom alebo snehovom poškodení lesa, poškodení podkôrnym hmyzom, požiarom alebo zásahu zameranom na zníženie množstva paliva. Aktualizácia mapy by mala prebehnúť aj po zmene vstupných údajov, napr. údajov o lesných porastoch po aktualizácii Programu starostlivosti o lesy.

Každá mapová vrstva musí obsahovať dátum alebo obdobie platnosti. Pri modelovaných údajoch treba uviesť aj dátum vstupných snímok, lesníckych údajov a terénneho overenia. Bez časovej informácie nemožno posúdiť, či vrstva ešte zodpovedá skutočnému stavu porastu.

Mapovanie lesného paliva môže mať klasifikačný alebo kvantitatívny charakter. Pri klasifikačnom prístupe sa územie zaraďuje do palivových typov alebo modelov. Pri kvantitatívnom prístupe sa pre jednotlivé priestorové jednotky odhadujú spojité hodnoty, napríklad množstvo paliva, hĺbka palivovej vrstvy, výška korunovej bázy alebo objemová hustota korunového paliva.

Klasifikačné mapy sú jednoduchšie na interpretáciu a praktické použitie, ale môžu zakrývať vnútornú premenlivosť palivových charakteristík. Kvantitatívne vrstvy poskytujú podrobnejšie vstupy do modelov správania požiaru, ich tvorba je však náročnejšia na terénne údaje a presnosť predikčných vzťahov.

Oba prístupy sa preto majú dopĺňať. Palivový typ môže predstavovať základnú tematickú kategóriu, ku ktorej sa priradia alebo pre ktorú sa samostatne odhadnú jednotlivé parametre. Pri každom odvodenom údaji musí byť uvedené, či ide o priamo meranú hodnotu, priemernú charakteristiku typu, klasifikačne priradenú hodnotu alebo priestorovú predikciu.

Rozvoj umelej inteligencie a strojového učenia umožňuje prepájať rozsiahle množstvo optických, radarových, laserových, topografických a lesníckych údajov. Súčasné prehľady však upozorňujú, že výsledná presnosť závisí predovšetkým od reprezentatívnosti terénnych vzoriek, výberu premenných a prenositeľnosti modelu medzi územiaми. Pri mapovaní lesného paliva sa často využíva metóda náhodných lesov (Random Forest), ktorá je vhodná na modelovanie nelineárnych vzťahov medzi palivovými charakteristikami a heterogénnymi environmentálnymi a diaľkovo snímanými prediktormi. Jej časté využitie súvisí aj s dobrou praktickou použiteľnosťou pri referenčných súboroch, ktorých rozsah je pri terénnom zisťovaní paliva často obmedzený. Výsledky však musia byť overené na nezávislých

údajoch, pričom pri priestorovo autokorelovaných dátach je potrebné uplatniť priestorovo oddelenú validáciu.

Metodika mapovania musí byť navrhnutá tak, aby bolo možné výsledky zopakovať, skontrolovať a aktualizovať. Každý krok od terénneho odberu cez spracovanie snímok až po vytvorenie výslednej vrstvy musí byť dokumentovaný.

Súčasťou výstupu musia byť metadáta obsahujúce názov a definíciu ukazovateľa, jednotku, zdroj údajov, dátum platnosti, priestorové rozlíšenie, súradnicový systém, použitú metódu, spôsob kalibrácie, výsledky overenia a mieru neistoty. Je potrebné rozlišovať údaje priamo merané, odvodené z existujúcich databáz, vypočítané modelom a priradené na základe klasifikačného pravidla.

Presnosť sa musí hodnotiť osobitne pre jednotlivé palivové triedy a parametre. Celková úspešnosť klasifikácie môže zakryť nízku presnosť menej zastúpených, ale požiarne významných tried. Pri klasifikačných výstupoch sa preto hodnotí správnosť jednotlivých kategórií a chyby ich zámeny. Pri kvantitatívnych vrstvách sa posudzuje veľkosť, smer a priestorové rozloženie odchýlok.

Neistota nemá byť chápaná ako doplnková informácia, ale ako súčasť výsledku. Vzniká pri terénnom výbere, meraní, odvodení palivových parametrov, priestorovej interpolácii, klasifikácii aj časovej aktualizácii. Transparentné uvedenie neistoty umožňuje rozlíšiť oblasti podložené kvalitnými terénnymi a diaľkovo snímanými údajmi od oblastí, v ktorých je výsledok založený prevažne na všeobecnom klasifikačnom pravidle.

Východiskom mapovania lesného paliva v podmienkach Slovenskej republiky je teda viaczdrojový, viacvrstvový a časovo aktualizovateľný prístup. Terénne zisťovanie poskytuje referenčný základ, lesnícke údaje opisujú priestorovú a porastovú štruktúru, diaľkový prieskum Zeme umožňuje rozšíriť hodnotenie na väčšie územie a geografické informačné systémy zabezpečujú spoločné priestorové spracovanie. Výsledkom nemá byť jediná nemenná mapa, ale sústava tematických vrstiev, ktorých význam, pôvod, presnosť a časová platnosť sú jednoznačne zdokumentované.

2.2. Priestorový rozsah a tematické zameranie mapovania

Priestorový rozsah mapovania lesného paliva musí zodpovedať účelu, na ktorý sa budú výsledky používať. Iné požiadavky sa kladú na celoštátnu databázu určenú na strategické hodnotenie, iné na regionálne plánovanie preventívnych opatrení a iné na podrobnú analýzu konkrétneho lesného porastu alebo územia na rozhraní lesa a zástavby. Pred začatím mapovania je preto potrebné jednoznačne určiť územný rozsah, základnú priestorovú jednotku, požadovanú informačnú podrobnosť, časovú platnosť údajov a spôsob ich následného využitia.

Pre potreby monografie sa priestorový rámec vzťahuje na lesné porasty Slovenskej republiky a na bezprostredne nadväzujúce plochy, ktorých palivové podmienky môžu ovplyvňovať vznik požiaru v lese alebo jeho prenos medzi lesným a nelesným prostredím. Do hodnotenia preto nemožno zahrnúť iba plochy formálne evidované ako lesné pozemky. Významné sú aj rúbaniská, plochy po poškodení lesných porastov, lesné okraje, ochranné pásma, lúky, pasienky, krovinové porasty, líniová vegetácia a územia na rozhraní lesa, poľnohospodárskej krajiny a zástavby.

Takto rozšírené priestorové vymedzenie je potrebné preto, že miesto iniciácie nemusí byť totožné s územím, na ktorom sa požiar následne rozvinie. Požiar môže vzniknúť v suchej tráve pri ceste,

na neobhospodarovanej poľnohospodárskej ploche alebo na okraji zastavaného územia a až následne môže preniknúť do lesa. Naopak, požiar vzniknutý v lesnom poraste sa môže šíriť smerom k sídlam, rekreačným zariadeniam, technickej infraštruktúre alebo poľnohospodárskym plochám. Priestorový rámec preto musí zachytiť aj priestorovú kontinuitu paliva medzi lesným porastom a jeho okolím.

Mapovanie lesného paliva sa navrhuje ako viacúrovňový systém, v ktorom sa rozlišuje celoštátna, regionálna, porastová a lokálna úroveň. Jednotlivé úrovne sa odlišujú požadovanou podrobnosťou, zdrojmi údajov, spôsobom overenia a charakterom výsledného výstupu. Nejde o navzájom nezávislé mapovania. Podrobnejšie úrovne majú poskytovať referenčné údaje na overenie a spresnenie všeobecnejších vrstiev, zatiaľ čo celoštátne a regionálne vrstvy vytvárajú rámec na výber území vyžadujúcich podrobný prieskum.

Celoštátna úroveň je určená na vytvorenie jednotného prehľadu o priestorovom rozložení základných typov lesného paliva na území Slovenskej republiky. Má umožniť porovnanie regiónov, identifikáciu rozsiahlejších súvislých území s podobnými palivovými podmienkami a výber oblastí, v ktorých je potrebné podrobnejšie zisťovanie. V tejto mierke sa využívajú najmä celoštátne lesnícke databázy, harmonizované produkty diaľkového prieskumu Zeme, digitálne modely reliéfu a regionálne modelované údaje.

Celoštátny výstup nemá podrobne opisovať každú lokálnu vrstvu opadu, skupinu krovín alebo jednotlivé ležiace kmene. Jeho úlohou je vytvoriť priestorovo súvislú a metodicky jednotnú klasifikáciu základných palivových podmienok. Podrobnosť musí byť dostatočná na strategické plánovanie, nemá však vytvárať dojem presnosti, ktorú vstupné údaje neposkytujú.

Regionálna úroveň je vhodná na hodnotenie územia kraja, okresu, správy chráneného územia, organizačnej zložky obhospodarovateľa lesa alebo iného funkčne vymedzeného regiónu. Umožňuje podrobnejšie zohľadniť regionálne rozdiely v drevinovom zložení, nadmorskej výške, reliéfe, spôsobe obhospodarovania, poškodení lesných porastov a dostupnosti terénnych údajov. Na tejto úrovni možno spresňovať klasifikačné pravidlá a kalibrovať modely pre konkrétne skupiny porastov.

Porastová úroveň sa viaže najmä na JPRL. Umožňuje prepájať palivové údaje s informáciami o revinovom zložení, veku, zakmenení, zásobe, vykonaných zásahoch a plánovanom hospodárení. JPRL je praktická na plánovanie opatrení, ale nemusí byť vnútorne homogénna z hľadiska paliva. Výsledky sa preto nemajú obmedziť na jedinú priemernú hodnotu priradenú celej jednotke.

Lokálna úroveň sa používa na podrobné hodnotenie experimentálnych plôch, lokalít s opakovaným výskytom požiarov, území na rozhraní lesa a zástavby, okolia kritickej infraštruktúry, rekreačne využívaných miest a plôch po poškodení lesa alebo po preventívnom zásahu. Na tejto úrovni možno využívať podrobné terénne meranie, bezpilotné letecké systémy, pozemné a mobilné laserové skenovanie a trojrozmerné modelovanie palivovej štruktúry.

Súčasnú európsku mapovaciu prácu ukazujú, že vybrané korunové parametre možno priestorovo odhadovať aj v kontinentálnom rozsahu. Aragoneses et al. (2024) vytvorili pre Európu mapy vybraných korunových palivových parametrov v rozlíšení 1 km. Kutchartt et al. (2025) následne publikovali paneurópske vrstvy výšky korunovej bázy a objemovej hustoty korunového paliva v približne 100 m rozlíšení. Takéto produkty sú vhodné predovšetkým na nadregionálne a regionálne hodnotenie; pri

detailnom hodnotení jednotlivých porastov majú slúžiť ako doplnkový alebo porovnávaci zdroj a vyžadujú overenie domácimi terénnymi údajmi (Aragoneses et al. 2024; Kutchartt et al. 2025).

Na celoštátne spracovanie je potrebné vytvoriť spoločnú priestorovú mriežku, v ktorej sa budú prepájať jednotlivé vstupné vrstvy. Ako jednotnú pracovnú mriežku možno použiť raster s bunkou 10×10 m. Takáto bunka umožňuje technicky zosúladiť vybrané vstupné vrstvy a zachovať podrobnosť potrebnú na reprezentáciu hraníc porastov, líniových prvkov a menších palivových plôch.

Bunka 10×10 m však neznamená, že každý palivový parameter bol priamo zmeraný alebo spoľahlivo odvodený na ploche 100 m^2 . Ide o spoločnú priestorovú jednotku spracovania. Skutočná informačná podrobnosť každej vrstvy zostáva určená pôvodným rozlíšením zdroja, hustotou pozorovaní, spôsobom odvodenia a rozsahom terénneho overenia.

Ak sa napríklad európsky korunový parameter vytvorený v rozlíšení približne 100 m alebo 1 km prevzorkuje na bunku 10×10 m, nezíska sa tým podrobnejšia informácia o jednotlivých častiach porastu. Všetky novovytvorené bunky zostávajú odvodené z pôvodne priestorovo hrubšieho údaj. Európske práce vytvorili priestorovo súvislé vrstvy korunových palivových parametrov v rozlíšení 1 km a približne 100 m. Takéto produkty sú vhodné najmä na celoeurópske, nadregionálne a regionálne hodnotenie; ich prevzorkovanie na jemnejšiu pracovnú mriežku nevytvára novú informáciu na úrovni jednotlivých porastových častí (Aragoneses et al. 2024; Kutchartt et al. 2025).

Výstupná databáza musí preto pri každom parametri uchovávať údaj o pôvodnom priestorovom rozlíšení. Vhodné je rozlišovať najmenej tieto kategórie pôvodu hodnoty:

- priame terénne meranie,
- údaj odvodený z bezpilotného alebo leteckého snímkovania,
- údaj odvodený z družicového diaľkového prieskumu Zeme,
- údaj prevzatý z lesníckej databázy,
- údaj odvodený priestorovým modelom,
- hodnota priradená podľa klasifikačného pravidla.

Rozlíšenie pôvodu údajov umožňuje správne interpretovať výsledky a zabraňuje tomu, aby bola modelovaná alebo klasifikačne priradená hodnota prezentovaná ako priame meranie.

Tematický rozsah mapovania musí vychádzať z procesov, ktoré majú výsledné údaje podporovať. V monografii sa rozlišujú tri hlavné tematické okruhy: palivo významné pre iniciáciu a vznik požiaru, palivo určujúce povrchové šírenie a palivo podmieňujúce vertikálny a korunový rozvoj požiaru. Toto členenie zabraňuje tomu, aby sa do jedného ukazovateľa spájali vlastnosti s rozdielnou funkciou.

Prvý tematický okruh sa zameriava na palivo, v ktorom môže dôjsť k iniciácii. Mapovať sa má najmä výskyt jemného odumretého povrchového paliva, jeho druh, plošná množstvo paliva, pokryvnosť, horizontálna kontinuita a podmienky ovplyvňujúce jeho vysušovanie. Aktuálna vlhkosť sa nepriraduje ako nemenná vlastnosť palivovej triedy, ale pripája sa ako dynamický údaj pre konkrétny čas.

Druhý tematický okruh zahŕňa parametre potrebné na hodnotenie povrchového šírenia. Okrem jemného paliva sa sleduje zastúpenie jednotlivých veľkostných a časových tried, hĺbka palivového lôžka, bylinné a krovinné palivo, ležiace drevo a priestorová kontinuita povrchovej vrstvy. Tieto údaje vytvárajú základ

na priradenie alebo tvorbu palivových modelov a na výpočet charakteristík správania povrchového požiaru (Rothermel 1972; Scott a Burgan 2005).

Tretí tematický okruh sa zameriava na vertikálnu štruktúru a korunové palivo. Zahŕňa výšku jednotlivých vegetačných vrstiev, rebríkové palivo, výšku korunovej bázy, výšku porastu, korunovú pokryvnosť, hĺbku korún, plošnú množstvo a objemovú hustotu jemného korunového paliva. Tieto charakteristiky sa používajú na hodnotenie možnosti prechodu povrchového požiaru do korún a potenciálu ďalšieho šírenia v korunovej vrstve (Andersen, McGaughey a Reutebuch 2005; Viedma et al. 2024).

Súčasný európske mapovacie postupy ukazujú, že výšku korunovej bázy a objemovú hustotu korunového paliva možno priestorovo odhadovať kombináciou družicových, lidarových a alometrických údajov. Výsledné vrstvy však zostávajú modelovými produktmi a pri použití na detailnejšej úrovni musia byť interpretované spolu s údajmi o neistote a podľa účelu overené presnejšími domácimi meraniami (Aragoneses et al. 2024; Kutchartt et al. 2025).

Tematická vrstva povrchového paliva má rozlišovať najmenej opad, hrabanku, bylinné palivo, krovinné palivo, jemné odumreté drevo a hrubé ležiace drevo. Jednotlivé zložky nemožno zlúčiť iba do spoločného celkového množstva, pretože majú rozdielny význam pri iniciácii, rýchlosti šírenia, intenzite a trvaní požiaru.

Pri opade a hrabanke sa má zaznamenávať dominantný druh materiálu, hrúbka vrstvy, plošná množstvo, stupeň rozkladu a pokryvnosť. Pri bylinnom a krovinovom palive je potrebná informácia o výške, pokryvnosti, podiele živých a odumretých častí a priestorovej kontinuite. Pri drevnom palive sa sleduje množstvo podľa rozmerových alebo časových tried, stupeň rozkladu a poloha voči povrchu.

Tematické rozlíšenie musí zostať také podrobné, aby sa z údajov dal určiť funkčný význam paliva. Príliš všeobecná kategória „lesná vegetácia“ neposkytuje informáciu o tom, či sa požiar bude šíriť opadom, suchou trávou, krovinami alebo ťažbovými zvyškami.

Rebríkové palivo sa má mapovať ako samostatná funkčná vrstva. Nestačí ho zahrnúť do všeobecného údaja o podraste. Hodnotiť sa má výška, pokryvnosť, hustota a vertikálna poloha vegetácie medzi povrchovým a korunovým palivom (Viedma et al. 2024).

Základným výstupom môže byť trieda vertikálnej kontinuity, počet identifikovaných palivových vrstiev, najmenšia vzdialenosť medzi susednými vrstvami alebo podiel zaplnených výškových intervalov. Pri podrobnom mapovaní možno vytvoriť trojrozmerný profil vegetácie.

Na regionálnej a celoštátnej úrovni je priame mapovanie rebríkového paliva obmedzené dostupnosťou údajov. Družicové optické snímky zachytávajú prevažne hornú časť vegetácie. Letecké laserové skenovanie môže poskytnúť informácie o vertikálnom rozdelení, ale v hustých porastoch je počet návratov zo spodných vrstiev nižší. Výsledok preto musí byť podporený terénnym zisťovaním a lokálnym pozemným alebo bezpilotným skenovaním (Campbell et al. 2018; Viedma et al. 2024).

Pri korunovom palive sa tematický rozsah zameriava na parametre potrebné na hodnotenie zapálenia korún a udržania korunového požiaru. Základom je výška korunovej bázy, výška porastu, korunová pokryvnosť, hĺbka korunovej vrstvy, plošné množstvo korunového paliva a jeho objemová hustota.

Výška korunovej bázy a objemová hustota korunového paliva sa nemajú zamieňať. Výška korunovej bázy vyjadruje funkčnú vzdialenosť od povrchu k spodnej hranici súvislej korunovej vrstvy. Objemová hustota

korunového paliva vyjadruje množstvo dostupného jemného paliva v jednotke objemu korún. Prvý parameter súvisí predovšetkým s iniciáciou horenia korún, druhý s udrжанím aktívneho korunového požiaru.

Európske výskumy ukázali možnosť priestorovo súvisle odhadovať korunové palivové parametre kombináciou družicového LiDAR, optických údajov, druhových informácií a alometrických vzťahov. Pri použití týchto modelov na Slovensku je však potrebné preveriť reprezentatívnosť použitých alometrických vzťahov, kvalitu vstupnej informácie o drevinovom zložení a presnosť odhadu vo viacvrstvových a zmiešaných porastoch (Aragoneses et al. 2024).

Statické mapovanie paliva sa musí doplniť o dynamické vrstvy, ktoré vyjadrujú jeho aktuálny stav. Najvýznamnejšou je vlhkosť jemného odumretého paliva. Podľa účelu možno doplniť vlhkosť ďalších časových tried, vlhkosť živej vegetácie, stav bylinného paliva a indikátory dlhodobého vysušenia.

Dynamické vrstvy sa majú spracúvať oddelene od základnej palivovej mapy. Každá hodnota musí obsahovať dátum a čas platnosti. Pri krátkodobom hodnotení rizika vzniku požiaru môže byť potrebná denná alebo hodinová aktualizácia. Pri sezónnom plánovaní možno pracovať s týždennými, mesačnými alebo fenologicky vymedzenými obdobiami.

Tematické vrstvy sa nemajú spájať do jedného celoročného priemeru. Priemerná ročná vlhkosť nezachytí krátke obdobie, počas ktorého jemné palivo dosiahne kriticky suchý stav. Rovnako sezónny priemer živej vegetácie nemusí zachytiť prechod bylinného paliva zo živej do odumretej zložky.

Pre hodnotenie rizika vzniku požiaru má byť vytvorený súbor vrstiev opisujúcich iniciačne významné palivo, jeho aktuálnu vlhkosť, kontinuitu a priestorový kontakt s možnými iniciačnými zdrojmi. Výstup nemá zahŕňať korunové charakteristiky ako priamy ukazovateľ vzniku požiaru, pretože tie ovplyvňujú najmä jeho následný vertikálny rozvoj.

Pre modelovanie správania povrchového požiaru je potrebná mapa palivových modelov alebo priestorové vrstvy ich jednotlivých parametrov. Tie sa spájajú s vetrom, sklonom a aktuálnou vlhkosťou. Výsledkom môžu byť scenáre rýchlosti šírenia, intenzity čela a dĺžky plameňa.

Pre hodnotenie prechodu do korún sa pripája výška korunovej bázy, rebríkové palivo a vlhkosť jemného korunového paliva. Pre hodnotenie aktívneho korunového požiaru sa dopĺňa objemová hustota a horizontálna kontinuita korún.

Pre plánovanie preventívnych opatrení sa majú vytvoriť vrstvy, ktoré umožnia určiť, ktorú časť palivového komplexu treba ovplyvniť. Na miestach častej iniciácie môže byť prioritou jemné povrchové palivo. V porastoch s nízkou výškou korunovej bázy môže byť potrebná redukcia rebríkového paliva. V hustých porastoch môže byť predmetom hodnotenia aj horizontálna kontinuita a objemová hustota korún.

Osobitne treba spracovať územia na rozhraní lesa a zástavby. Palivové podmienky sa tu musia hodnotiť spolu s polohou budov, komunikácií, technickej infraštruktúry, rekreačných plôch a možných iniciačných zdrojov. Dôležitá je nielen palivová charakteristika lesa, ale aj súvislosť vegetácie medzi lesným porastom a chránenými objektmi.

Samostatnú skupinu tvoria plochy po poškodení lesných porastov. Pri nich je potrebné uviesť druh poškodenia, jeho rozsah, čas od udalosti a aktuálnu polohu odumretej biomasy. Poškodenie vetrom,

snehom, suchom alebo podkôrnym hmyzom mení palivový komplex v niekoľkých etapách a nemožno ho zachytiť jednou nemennou kategóriou.

Osobitné spracovanie si vyžadujú aj plochy po ťažbe, kde sa množstvo povrchového paliva mení podľa spôsobu spracovania a odstránenia zvyškov. Rúbanisko s odvezeným materiálom má iné podmienky než plocha s ponechanými vrcholcami a vetvami. V ďalšom období sa zároveň rozvíja bylinná a krovinná vegetácia, ktorá mení dominantný typ paliva.

V chránených územiach a prirodzených lesoch sa môže nachádzať vysoké množstvo odumretého dreva, jeho význam však nemožno hodnotiť bez rozlíšenia jemných a hrubých frakcií, stupňa rozkladu a prítomnosti iniciačne významného paliva. Mapovanie musí rešpektovať predmet ochrany a nemá automaticky viesť k požiadavke odstránenia všetkého odumretého materiálu.

Okrem mapy aktuálneho stavu je vhodné vytvárať sezónne a vývojové scenáre. Sezónne scenáre majú zachytiť najmä jarné obdobie s vysokým podielom odumretej trávy a bylinných zvyškov, obdobie plného rozvoja vegetácie a letné až jesenné obdobie s možným vysušením živej aj odumretej zložky.

Vývojové scenáre sa môžu použiť na plochách po ťažbe alebo poškodení lesa. Majú vyjadriť predpokladané premiestňovanie paliva z korún na povrch, obnovu bylinného a krovinného krytu, rozpad hrubého dreva a zmenu horizontálnej a vertikálnej kontinuity.

Scenár nie je náhradou pravidelnej aktualizácie. Predstavuje odborný odhad možného vývoja a musí byť overovaný novými terénnymi alebo diaľkovo snímanými údajmi. Každý scenár musí obsahovať východiskový rok, predpoklady vývoja a interval, na ktorý sa vzťahuje.

Výsledkom mapovania nemá byť jedna súhrnná vrstva, ale navzájom prepojená sústava tematických údajov. Základnú sústavu majú tvoriť:

- priestorové rozšírenie povrchových palivových typov,
- množstvo paliva podľa jednotlivých zložiek,
- hĺbka a kontinuita povrchovej vrstvy,
- bylinné a krovinné palivo,
- jemné a hrubé ležiace drevo,
- rebríkové palivo a vertikálna kontinuita,
- výška korunovej bázy,
- korunová pokrývnosť a výška porastu,
- plošné množstvo a objemová hustota korunového paliva,
- dynamické vrstvy vlhkosti paliva,
- informácia o pôvode, aktuálnosti a neistote každej hodnoty.

Takáto štruktúra umožňuje používať jednotlivé vrstvy podľa konkrétnej úlohy. Pri hodnotení rizika vzniku požiaru sa vyberú parametre iniciačne významného paliva a aktuálnej vlhkosti. Pri modelovaní povrchového požiaru sa použijú parametre povrchového palivového modelu. Pri hodnotení korunového rozvoja sa doplnia rebríkové a korunové charakteristiky.

Priestorový rozsah a tematické zameranie mapovania spolu úzko súvisia. Rozsah hodnoteného územia ovplyvňuje požadovanú podrobnosť spracovania, výber vhodných zdrojov údajov a spôsob ich overenia.

Tematický účel mapovania zároveň určuje, ktoré charakteristiky paliva je potrebné zisťovať a priestorovo vyjadriť. Metodika preto musí rešpektovať skutočnú informačnú podrobnosť vstupných údajov. Výsledkom má byť viacúrovňový systém, ktorý umožní prechod od celoštátneho prehľadu k podrobnejšiemu hodnoteniu konkrétneho lesného porastu, pričom podrobnosť výsledku nesmie byť vyššia, než umožňuje kvalita a priestorové rozlíšenie použitých vstupných údajov.

2.3. Vstupné údaje využiteľné pri mapovaní paliva

Mapovanie lesného paliva je založené na prepájaní údajov, ktoré vznikli rozdielnymi spôsobmi, v rozdielnom čase a s rozdielnou priestorovou podrobnosťou. Vstupom môžu byť výsledky terénnych meraní, údaje lesníckeho mapovania a evidencie, topografické a environmentálne vrstvy, vrstvy diaľkového prieskumu Zeme, výstupy laserového skenovania, meteorologické údaje, záznamy o poškodení lesných porastov a informácie o vykonaných hospodárskych zásahoch. Ich využiteľnosť však nezávisí iba od dostupnosti. Každý zdroj musí byť posúdený podľa toho, akú palivovú vlastnosť opisuje, v akej mierke bol vytvorený, ku ktorému obdobiu sa vzťahuje a s akou neistotou je spojený (Keane 2015; Prichard et al. 2023).

Základnou metodickou zásadou je, že vstupný údaj sa vyberá podľa hodnoteného palivového parametra, nie podľa technickej dostupnosti dát. Zdroj vhodný na odvodenie výšky porastu alebo korunovej pokryvnosti nemusí poskytovať spoľahlivú informáciu o množstve opadu, hrúbke hrabanky alebo o jemnom palive ukrytom pod korunovou vrstvou. Rovnako porastová mapa alebo údaj o drevinovom zložení nemôžu bez ďalšieho overenia nahradiť meranie množstva povrchového paliva.

Vstupné údaje treba chápať ako navzájom sa dopĺňajúce zdroje. Terénne merania poskytujú priamu informáciu o palive na konkrétnych miestach, ale nepokrývajú územie súvislo. Diaľkový prieskum Zeme umožňuje vytvárať priestorovo súvislé vrstvy, mnohé vlastnosti paliva však zachytáva nepriamo. Lesnícke údaje poskytujú dôležitý opis porastu, ale zvyčajne neobsahujú všetky parametre potrebné na charakterizáciu palivového komplexu a modelovanie správania požiaru. Spoľahlivý výsledok preto vyžaduje kombináciu viacerých zdrojov a zachovanie väzby medzi referenčným meraním, vysvetľujúcimi údajmi, odvodenou hodnotou a výslednou mapovou vrstvou (Keane 2015; Shaik et al. 2025).

Z hľadiska funkcie v procese mapovania možno vstupné údaje rozdeliť na referenčné, priestorovo opisné, vysvetľujúce, dynamické, validačné a doplnkové.

Referenčné údaje predstavujú priamo zistené charakteristiky paliva. Zahŕňajú terénne merania množstva a zloženia povrchového paliva, hĺbky palivového lôžka, pokryvnosti bylín a krovín, rozmerového zastúpenia ležiaceho dreva, vlhkosti paliva a vybraných parametrov korunovej vrstvy. Referenčný súbor sa podľa účelu následne rozdeľuje na údaje určené na charakterizáciu a kalibráciu a na nezávislé údaje určené na overenie výsledných modelov a mapových vrstiev.

Priestorovo opisné údaje vymedzujú polohu a základné vlastnosti lesných porastov a ďalších krajinných prvkov. Patria sem hranice JPRL, porastové mapy, drevinové zloženie, vek, zakmenenie, výška porastu, spôsob využívania krajiny, hranice lesných a nelesných plôch, cestná sieť, vodné toky, zastavané územia a ďalšie prvky významné pre priestorovú interpretáciu paliva.

Vysvetľujúce údaje sa používajú na odvodenie palivových vlastností v miestach bez priameho merania. Môžu zahŕňať spektrálne ukazovatele vegetácie, výškové a štruktúrne charakteristiky odvodené

z laserového skenovania, radarové premenné, topografické charakteristiky, pôdne vlastnosti, stanovištné podmienky a niektoré porastové údaje. Ich využiteľnosť sa musí preukázať vzťahom ku konkrétnemu terénne zistenému palivovému parametru, a to štatistickým, fyzikálne zdôvodneným alebo klasifikačným postupom.

Dynamické údaje opisujú vlastnosti, ktoré sa menia v krátkom čase. Ide najmä o vlhkosť jemného odumretého paliva, vlhkosť živej vegetácie, meteorologické podmienky a fenologický stav bylinného a krovinného paliva. Tieto údaje sa nepriradujú natrvalo k palivovému typu, ale ukladajú sa ako samostatné časovo označené vrstvy.

Overovacie (verifikačné) údaje predstavujú nezávislé merania alebo pozorovania určené na posúdenie správnosti výsledkov. Nesmú byť súčasťou súboru použitého na kalibráciu príslušného klasifikačného alebo kvantitatívneho modelu. Ich oddelenie je nevyhnutné na objektívne posúdenie presnosti čiastočného alebo konečného výsledku.

Doplňkové údaje nevstupujú vždy priamo do výpočtu palivového parametra, ale podporujú jeho interpretáciu a aktualizáciu. Patria sem záznamy o ťažbe, pestovných opatreniach, požiaroch, vetrovom a snehovom poškodení, poškodení podkôrnym hmyzom, suchu, preventívnych zásahoch a ďalších udalostiach meniacich množstvo, charakter alebo polohu paliva.

Pri spracovaní je potrebné dôsledne rozlišovať priamo merané a odvodené hodnoty. Priamo meraný údaj vzniká pozorovaním alebo meraním konkrétnej vlastnosti na určenej ploche alebo transekte. Jeho platnosť sa vzťahuje na miesto, čas a metodiku merania.

Odvodený údaj vzniká výpočtom, klasifikáciou, interpoláciou alebo predikčným modelom. Môže byť založený na vzťahu medzi terénnym meraním a premennými získanými z diaľkového prieskumu Zeme, na alometrických rovniciach, expertných pravidlách alebo na kombinácii viacerých zdrojov. Takýto údaj sa nemá prezentovať ako priame meranie, aj keď je výsledná vrstva spracovaná vo veľmi jemnom rastru.

Osobitnou kategóriou sú hodnoty priradené podľa palivového typu. Pri nich nejde o individuálny odhad konkrétnej bunky alebo porastu, ale o prevzatie reprezentatívnej hodnoty určenej pre širšiu kategóriu. Takéto údaje sú využiteľné tam, kde podrobnejšie merania nie sú dostupné, musia však byť označené ako klasifikačne priradené a sprevádzané informáciou o rozsahu hodnôt, z ktorých boli odvodené.

Pri každom palivovom parametri sa preto musí viesť atribút pôvodu hodnoty, ktorý jednoznačne rozlíši priamo meraný, odvodený alebo modelovaný a klasifikačne priradený údaj. Ten môže rozlišovať:

- priame terénne meranie,
- laboratórne stanovenie,
- odvodenie z lesnických údajov,
- odvodenie z optických snímok,
- odvodenie z radarových údajov,
- odvodenie z laserového skenovania,
- priestorovú interpoláciu,
- predikciu štatistickým alebo strojovým modelom,
- priradenie podľa palivového typu,
- expertný odhad.

Toto rozlíšenie je dôležité pri posudzovaní presnosti, aktualizácii databázy aj pri neskoršom použití údajov v modeloch správania požiaru.

Každý vstup musí mať jasnú väzbu na konkrétnu vlastnosť paliva. Všeobecná korelácia s vegetáciou alebo biomasou ešte neznamená, že údaj spoľahlivo opisuje palivový parameter.

Napríklad, drevinové zloženie možno použiť ako pomocný ukazovateľ druhu opadu, štruktúry korún alebo chemických vlastností paliva. Samo osebe však neurčuje aktuálne množstvo paliva. Vek porastu môže súvisieť s výškou a štruktúrou koruny, ale nevyjadruje priamo množstvo krovín, odumretých vetiev alebo ležiaceho dreva. Vegetačný index môže reagovať na množstvo a stav zelenej vegetácie, nemusí však rozlíšiť suchý opad pod zapojenou korunovou vrstvou.

Pri každom vstupe sa preto musí určiť, či:

- priamo vyjadruje hodnotený parameter,
- slúži ako vysvetľujúca premenná na jeho odhad,
- používa sa iba na priestorové vymedzenie,
- podporuje klasifikáciu palivového typu,
- slúži na aktualizáciu alebo detekciu zmeny,
- slúži na overenie výsledku.

Bez takéhoto rozlíšenia môže dôjsť k dvojitému započítaniu rovnakej informácie alebo k nesprávnej interpretácii nepriamych ukazovateľov ako skutočných vlastností paliva.

Vstupné vrstvy musia byť prevedené do spoločného súradnicového systému, musia mať jednoznačne definovanú polohu a musia byť vzájomne priestorovo zosúladené. Technické zosúladenie však neznamená, že všetky údaje majú rovnakú skutočnú podrobnosť.

Priestorová kompatibilita zahŕňa:

- súlad súradnicového referenčného systému,
- správnu priestorovú polohu vrstiev,
- známe pôvodné priestorové rozlíšenie,
- primeranú presnosť hraníc a objektov,
- zhodný spôsob rastrového zarovnania,
- definovaný spôsob prevzorkovania,
- rešpektovanie podpornej plochy merania.

Podporná plocha vyjadruje územie, ku ktorému sa hodnota skutočne vzťahuje. Terénna vzorka môže reprezentovať malú odberovú plochu, kruhovú plochu alebo celý transekt. Porastový údaj môže byť priemerom pre niekoľko hektárov. Družicová bunka predstavuje plošný priemer alebo zloženú spektrálnu odozvu. Tieto rozdiely nemožno odstrániť iba prevodom všetkých vrstiev na raster 10 × 10 m.

Pri prevode spojitých údajov možno podľa ich charakteru použiť bilinéarne alebo kubické prevzorkovanie. Pri kategóriách, identifikátoroch a palivových typoch sa používa metóda najbližšieho suseda, aby nevznikli neexistujúce medziahľé triedy. Pri agregácii jemnejších údajov do hrubšej mriežky sa môže použiť priemer, medián, suma, maximum, dominantná trieda alebo podiel pokrytia. Zvolený postup musí zodpovedať významu konkrétneho parametra.

Palivové vrstvy nemožno vytvárať bez kontroly času vzniku vstupných údajov. Porastová mapa, letecké laserové skenovanie, družicová snímka a terénne meranie môžu pochádzať z rozdielnych rokov. Ak medzi ich získaním prebehla ťažba, poškodenie lesa alebo výrazná obnova vegetácie, ich priame prepojenie môže viesť k nesprávnemu výsledku.

Pri každom vstupe sa musí evidovať:

- dátum alebo obdobie získania,
- obdobie, ktoré údaj reprezentuje,
- dátum poslednej aktualizácie,
- známe udalosti medzi získaním jednotlivých vrstiev,
- predpokladaná dĺžka platnosti.

Relatívne stabilné údaje možno kombinovať aj pri určitom časovom rozdieli, ak sa preukáže, že v území nenastala významná zmena. Pri dynamických charakteristikách sa vyžaduje časová zhoda alebo presne definovaný spôsob prepočtu. Meteorologický údaj a meranie vlhkosti paliva musia byť vzťahované ku konkrétnemu dátumu a podľa potreby aj k hodine.

Sezónnosť je významná najmä pri optických snímkach. Spektrálny prejav porastu sa mení počas rašenia, plného olistenia, senescencie a obdobia vegetačného pokoja. Pri klasifikácii paliva je preto vhodné používať časové rady alebo snímky z fenologicky porovnateľných období, nie náhodne vybrané zábery z rôznych častí roka.

Všetky vstupy musia používať jednoznačné definície a porovnateľné jednotky. Rovnaký názov parametra môže v rôznych databázach označovať rozdielne veličiny. Napríklad korunová pokrývnosť môže byť definovaná ako zvislý priemet korún bez prekrytia alebo ako súčet priemetov jednotlivých korún. Výška korunovej bázy môže označovať najnižšiu živú vetvu, priemernú bázu koruny alebo funkčnú hranicu súvislého korunového paliva.

Pred prepojením údajov sa preto musí vytvoriť dátový slovník obsahujúci:

- názov parametra,
- jeho odbornú definíciu,
- jednotku,
- spôsob merania alebo odvodenia,
- priestorovú a časovú platnosť,
- povolený rozsah hodnôt,
- spôsob zaobchádzania s chýbajúcimi údajmi.

Palivová množstvo sa má vyjadrovať ako suchá hmotnosť na jednotku plochy, spravidla v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ alebo $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Pri prevode platí $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} = 10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Objemová hustota palivového lôžka a objemová hustota korunového paliva sa vyjadrujú v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, nejde však o zameniteľné parametre. Prvý sa vzťahuje na povrchovú vrstvu a druhý na jemné palivo v korunovom priestore.

Vlhkosť sa musí uvádzať s presnou definíciou menovateľa. Pri palivách sa zvyčajne používa gravimetrická vlhkosť vzťahnutá na suchú hmotnosť (19):

$$M = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (19)$$

kde:

M – gravimetrická vlhkosť paliva (%)

m_v – hmotnosť vlhkej vzorky (g)

m_s – hmotnosť vysušenej vzorky (g)

Údaj založený na suchej hmotnosti nemožno bez prepočtu kombinovať s vlhkosťou vyjadrenou vo vzťahu k celkovej vlhkej hmotnosti vzorky.

Pred zaradením do spracovania sa musí každý vstup podrobiť kontrole kvality. Tá zahŕňa geometrickú, atribútovú, tematickú a časovú kontrolu.

Geometrická kontrola overuje správnosť polohy, úplnosť geometrie, topologické chyby, prekryvy, medzery a súlad hraníc. Atribútová kontrola zisťuje chýbajúce hodnoty, nesprávne formáty, duplicity, hodnoty mimo prípustného rozsahu a nekonzistentné kódy. Tematická kontrola posudzuje, či význam údajov zodpovedá hodnotenému parametru. Časová kontrola preveruje aktuálnosť a vzájomnú časovú zhodu vrstiev.

Úplnosť sa nemá hodnotiť iba podľa pokrytia územia. Vrstva môže byť priestorovo súvislá, ale tematicky nedostatočná. Napríklad celoštátna vegetačná mapa môže pokrývať celé územie, ale nemusí obsahovať informácie o množstve povrchového paliva. Naopak, presné terénne merania môžu poskytovať tematicky kvalitný údaj, ale iba pre obmedzený počet plôch.

Vhodné je preto osobitne hodnotiť:

- priestorovú úplnosť,
- tematickú úplnosť,
- časovú aktuálnosť,
- atribútovú úplnosť,
- reprezentatívnosť referenčných údajov.

Terénne údaje musia zachytiť hlavné zdroje variability paliva v podmienkach Slovenskej republiky. Výber plôch sa nemá obmedziť na ľahko dostupné alebo typické porasty. Takýto výber by mohol viesť k systematickému podhodnoteniu poškodených, ťažko prístupných, viacvrstvových alebo mimoriadne heterogénnych porastov.

Pri návrhu referenčného súboru treba zohľadniť najmä:

- drevinové zloženie,
- vek a vývojové štádium porastu,
- zakmenenie a korunový zápoj,
- stanovištné a lesnícko-typologické podmienky,
- nadmorskú výšku a reliéf,
- spôsob obhospodarovania,
- prítomnosť bylinného a krovinového podrastu,
- množstvo odumretého dreva,
- druh a štádium poškodenia lesného porastu,

- okrajový alebo vnútorný charakter porastu.

Počet meraní sa má určovať podľa variability parametra, nie iba podľa rozlohy územia. Heterogénne palivové zložky, napríklad ležiace drevo alebo kroviny, môžu vyžadovať väčší počet pozorovaní než rovnomernejšia vrstva opadu.

Pri základnom mapovaní lesného paliva sa odporúča zabezpečiť minimálne tieto skupiny vstupov:

- hranice lesných porastov a ďalších hodnotených plôch,
- drevinové zloženie a základné porastové charakteristiky,
- aktuálnu mapu krajinej pokrývky,
- digitálny model reliéfu,
- terénne údaje o povrchovom palive,
- údaje o bylinnom a krovinovom podraсте,
- údaje o výške a štruktúre korunovej vrstvy,
- informácie o ťažbe a poškodení lesných porastov,
- aktuálne optické alebo radarové snímky,
- dostupné údaje laserového skenovania,
- meteorologické údaje potrebné na odvodenie dynamického stavu paliva,
- nezávislé údaje určené na overenie výsledkov.

Minimálny súbor neznamená, že všetky vstupy musia byť na celom území dostupné s rovnakou podrobnosťou. Metodika však musí rozlišovať územia s dostatočným dátovým pokrytím od území, v ktorých boli hodnoty doplnené modelom alebo všeobecným klasifikačným pravidlom.

Ak je pre ten istý parameter k dispozícii viac zdrojov, treba stanoviť ich hierarchiu. Prednosť má mať aktuálny, tematicky priamy, priestorovo primeraný a overený údaj.

Všeobecnú hierarchiu možno vyjadriť nasledovne:

- aktuálne priame meranie vykonané štandardizovanou metódou,
- lokálne kalibrovaný odhad založený na podrobných priestorových údajoch,
- údaj odvodený z domácich lesníckych alebo environmentálnych databáz,
- regionálny model overený na území Slovenska,
- nadregionálny alebo európsky produkt overený domácimi údajmi,
- hodnota priradená podľa zahraničnej klasifikácie alebo expertného pravidla.

Hierarchia nie je absolútna. Staré alebo nereprezentatívne terénne meranie môže byť menej vhodné než aktuálny a dobre kalibrovaný diaľkovo snímaný odhad. O výbere preto rozhoduje kombinácia tematickej vhodnosti, aktuálnosti, priestorovej podrobnosti a známej neistoty.

Každý vstup musí byť sprevádzaný metadátami. Minimálny metadátový záznam má obsahovať:

- názov súboru alebo vrstvy,
- správcu a poskytovateľa údajov,
- dátum získania a aktualizácie,
- územný rozsah,

- súradnicový systém,
- formát,
- priestorové rozlíšenie alebo mierku,
- odbornú definíciu atribútov,
- metódu vytvorenia,
- presnosť a známe obmedzenia,
- licenčné a prístupové podmienky,
- osobu alebo pracovisko zodpovedné za spracovanie.

Pri odvodených vrstvách sa musí uchovávať aj verzia algoritmu, použité vstupy, parametre modelu, kalibračný súbor a výsledky overenia. Vďaka tomu možno spätne zistiť, ako bola konkrétna hodnota vytvorená a či ju treba po aktualizácii zdrojových údajov prepočítať.

Chýbajúce hodnoty sa nesmú automaticky nahrádzať nulou. Nulová hodnota znamená, že palivová zložka bola hodnotená a nebola zistená. Chýbajúca hodnota znamená, že údaj nebol dostupný alebo ho nebolo možné spoľahlivo určiť. Zámena týchto stavov by viedla k systematickému podhodnoteniu paliva.

Pri chýbajúcich údajoch možno použiť:

- doplňujúce terénne zisťovanie,
- odvodenie z príbuzných premenných,
- priestorovú interpoláciu,
- priradenie podľa porovnateľného palivového typu,
- regionálny alebo celoštátny model.

Každá doplnená hodnota musí byť označená spôsobom jej vzniku. Súčasne sa má vytvoriť vrstva dostupnosti alebo dôveryhodnosti údajov, ktorá umožní rozlíšiť priamo zistené a modelovo doplnené časti územia.

Pred samotným spracovaním je vhodné vytvoriť maticu vstupných údajov (tabuľka 1). Pre každý plánovaný palivový parameter sa v nej uvedie jeho význam, jednotka, požadovaná priestorová a časová podrobnosť, primárny a doplnkový zdroj, metóda odvodenia a spôsob overenia.

Navrhovaná matica neslúži iba na evidenciu dostupných dát, ale na kontrolu úplnosti celého informačného reťazca od merania po overenie výsledku.

Tabuľka 1 Príklad základnej štruktúry matice

Palivový parameter	Primárny zdroj	Doplnkový zdroj	Spôsob odvodenia	Spôsob overenia
množstvo opadu	terénne odbery	drevinové a porastové údaje	lokálny predikčný model	nezávislé terénne plochy
bylinná pokrývnosť	terénne hodnotenie	optické snímky	klasifikácia alebo regresia	kontrolné plochy
množstvo ležiaceho dreva	transektové meranie	laserové skenovanie	priestorový model	nezávislé transekty

Palivový parameter	Primárny zdroj	Doplňkový zdroj	Spôsob odvodenia	Spôsob overenia
výška korunovej bázy	terénne alebo lidarové údaje	porastové charakteristiky	vertikálna analýza alebo regresia	kontrolné meranie
objemová hustota korunového paliva	alometrické a lidarové údaje	drevinové zloženie a výška korún	výpočet a priestorová predikcia	nezávislé terénne údaje a/alebo nezávisle odvodené korunové parametre
vlhkosť jemného paliva	priame meranie	meteorologické údaje	dynamický model	súbežné kontrolné merania

Takáto matica umožňuje ešte pred začatím analýzy identifikovať nedostatky dátového pokrytia, rozdiely v mierke a parametre, pri ktorých bude potrebné vytvoriť nový model alebo zabezpečiť doplňujúci terénny zber.

Vstupné údaje využiteľné pri mapovaní lesného paliva teda netvoria iba súbor dostupných vrstiev, ale funkčne usporiadaný dátový systém, v ktorom musí byť pri každom údaji známy jeho odborný význam, pôvod, časová platnosť, skutočná priestorová podrobnosť, spôsob odvodenia a neistota.

2.4. Lesnícke, topografické, environmentálne údaje a údaje diaľkového prieskumu Zeme

Tvorba priestorových vrstiev lesného paliva vyžaduje kombináciu údajov, ktoré opisujú lesný porast, reliéf, stanovištné podmienky, aktuálny stav vegetácie a zmeny spôsobené hospodárskymi zásahmi alebo poškodením lesa. Jednotlivé zdroje údajov majú rozdielny tematický význam. Lesnícke údaje poskytujú základnú charakteristiku porastov a stanovišťa, topografické údaje opisujú reliéf a polohu krajinných prvkov, environmentálne údaje zachytávajú pôdne, klimatické a stanovištné podmienky a údaje diaľkového prieskumu Zeme umožňujú odvodiť priestorovo súvislé charakteristiky vegetácie a identifikovať zmeny v krajine.

Žiadna z týchto skupín údajov neposkytuje samostatne úplný obraz o lesnom palive. Lesnícke databázy spravidla neobsahujú priamo merané množstvo opadu, bylinného alebo krovinného paliva. Optické družicové údaje nemusia zachytiť povrchové palivo pod zapojenými korunami. Digitálny model reliéfu opisuje terén, nie však palivo. Meteorologické údaje umožňujú odhadovať jeho aktuálnu vlhkosť, ale neposkytujú informáciu o množstve a priestorovom usporiadaní palivovej vrstvy. Metodika preto vychádza z ich účelového prepájania a z overovania odvodených údajov terénnym zisťovaním.

Pri každom vstupe sa musí evidovať poskytovateľ, presný názov produktu alebo databázy, dátum alebo verzia, pôvodná mierka alebo priestorové rozlíšenie, formát, územný rozsah, spôsob využitia a známe obmedzenia. Dátum získania súboru nie je vždy totožný s obdobím, ktoré údaj opisuje. Napríklad porastový údaj môže byť sprístupnený v roku 2026, ale pochádzať z programu starostlivosti o lesy vyhotoveného niekoľko rokov pred jeho prevzatím. Pre posúdenie aktuálnosti je preto rozhodujúci dátum alebo obdobie, ku ktorému sa obsah údajov vzťahuje, nie iba dátum jeho získania alebo stiahnutia.

Základným zdrojom lesníckych údajov pre územie Slovenskej republiky je Informačný systém lesného hospodárstva spravovaný Národným lesníckym centrom. Jeho súčasťou sú údaje programov starostlivosti o lesy (PSL), opisy porastov, plány hospodárskych opatrení, lesnícke mapy a údaje lesnej hospodárskej evidencie o realizovaných hospodárskych opatreniach (Národné lesnícke centrum 2026).

Z opisov lesných porastov možno pri mapovaní paliva využiť najmä:

- identifikátor JPRL,
- plochu a hranice porastu/JPRL,
- kategóriu lesa a tvar hospodárskeho spôsobu,
- drevinové zloženie,
- vek alebo vekové rozpätie drevín,
- zakmenenie,
- strednú výšku a hrúbku drevín,
- zásobu dreva,
- vývojové štádium porastu,
- údaje o obnove, výchove a ťažbe,
- informácie o poškodení porastu,
- stanovištné a lesnícko-typologické zaradenie.

Tieto charakteristiky nemožno považovať za priame údaje o lesnom palive. Ide o vysvetľujúce a stratifikačné údaje. Ich vzťah ku konkrétnemu parametru paliva musí byť preukázaný terénymi údajmi alebo overeným modelovým vzťahom.

Drevinové zloženie súvisí s druhom opadu, architektúrou korún a podielom jemných vetiev. Vek, zakmenenie a výška porastu ovplyvňujú korunovú pokryvnosť, množstvo svetla prenikajúceho k povrchu, vývoj bylinného a krovínového podrastu a podmienky vysušovania povrchovej vrstvy.

Údaje lesnej hospodárskej evidencie (LHE) sú významné pri aktualizácii palivových vrstiev. Ťažba, prebierka, prerezávka, obnova porastu alebo spracovanie poškodeného dreva môžu v krátkom čase zmeniť množstvo a polohu paliva. Bezprostredne po zásahu sa môže zvýšiť množstvo jemných a hrubších zvyškov na povrchu. Neskôr sa môže zmeniť bylinná a krovínová vegetácia, oslnenie povrchu a rýchlosť vysušovania opadu.

Pri využívaní lesníckych údajov je potrebné kontrolovať časový nesúlad medzi opisom porastu a aktuálnym stavom. PSL má viacročnú platnosť a nemusí okamžite zachytiť vetrové poškodenie, poškodenie podkôrnym hmyzom, rozsiahle sucho alebo neplánovanú ťažbu. Priestorová vrstva odvodená iba zo staršieho opisu porastu preto musí byť aktualizovaná pomocou LHE, aktuálnych snímok a terénneho overenia.

Hranice JPRL sú vhodné na agregáciu výsledkov a plánovanie opatrení, ale nie vždy vyjadrujú homogénne palivové podmienky. V rámci jedného porastu sa môžu nachádzať medzery, husté zmladenie, poškodené skupiny stromov, mokrade, skalné plochy alebo miesta s nahromadeným drevným materiálom. Porastové polygóny preto majú slúžiť ako organizačná a interpretačná vrstva, nie ako jediná analytická jednotka.

Lesnícko-typologické jednotky charakterizujú ekologické a produkčné podmienky lesných stanovišť. Pri mapovaní paliva možno využiť najmä hospodárske súbory lesných typov, skupiny lesných typov, lesné typy, vegetačné lesné stupne, edaficko-trofické rady a ďalšie stanovištné charakteristiky.

Ich význam spočíva v tom, že poskytujú stabilnejší opis stanovišťa než aktuálne drevinové zloženie. Pomáhajú interpretovať potenciálne druhové zloženie, produkciu biomasy, rýchlosť rozkladu opadu, pôdnu vlhkosť, vývoj bylinného porastu a dlhodobé podmienky vysušovania.

Lesnícko-typologické zaradenie však nie je palivovým modelom. Rovnaký lesný typ môže byť zastúpený porastmi rozdielneho veku, drevinového zloženia, hustoty a spôsobu obhospodarovania. Typologické údaje sa preto používajú ako stratifikujúca a vysvetľujúca vrstva, nie ako priama náhrada terénneho zisťovania paliva.

Topografické údaje určujú polohu, tvar a výškové usporiadanie krajiny. Pri mapovaní lesného paliva sa využívajú najmä digitálne modely reliéfu, digitálne modely povrchu, ortofotomozaiky, základná báza geografického informačného systému (ZBGIS), dopravná a hydrografická sieť, administratívne hranice, budovy a ďalšie priestorové objekty.

Základným národným zdrojom referenčných topografických a výškových údajov je ZBGIS spravovaný v pôsobnosti Úradu geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky (ÚGKK SR) a Geodetického a kartografického ústavu Bratislava (GKÚ Bratislava). Dostupné sú rastrové a vektorové produkty, ortofotomozaika, údaje leteckého laserového skenovania, klasifikované mračná bodov a digitálne modely reliéfu a povrchu.

Digitálny model reliéfu predstavuje výšku terénu bez vegetácie a stavieb. Z neho možno odvodiť:

- nadmorskú výšku,
- sklon svahu,
- orientáciu svahu,
- zakrivenie reliéfu,
- topografickú polohu,
- potenciálne oslnenie,
- smer povrchového odtoku,
- akumulčné a odtokové časti svahov,
- morfológické prvky reliéfu významné pre interpretáciu šírenia požiaru.

Pre celé územie Slovenskej republiky je dostupný digitálny model reliéfu 5. generácie (DMR 5.0) vytvorený z prvého cyklu leteckého laserového skenovania v priestorovom rozlíšení 1 m. V rámci druhého cyklu leteckého laserového skenovania 2022–2026 sa vytvára DMR 6.0 s priestorovým rozlíšením 0,5 m, pričom pri konkrétnom spracovaní sa musí overiť dostupnosť produktu pre hodnotené územie a dátum jeho snímania (ÚGKK SR/GKÚ Bratislava 2026).

Rozdiel medzi digitálnym modelom reliéfu (DMR) a digitálnym modelom povrchu (DMP) možno využiť ako pomocný ukazovateľ výšky objektov nad terénom. V lesnom prostredí však jednoduchý rozdiel modelov nemožno automaticky považovať za presnú výšku porastu. Výsledok môže ovplyvniť dátum snímania, hustota laserových bodov, klasifikácia mračna bodov, nerovnosť terénu a spôsob interpolácie.

Sklon a orientácia svahu sa nemajú interpretovať ako priame vlastnosti paliva. Ovplyvňujú však oslnenie, teplotu povrchu, dostupnosť vody a rýchlosť vysušovania. Ich význam sa uplatňuje pri odhade priestorovej variability vlhkosti a pri následnom modelovaní šírenia požiaru.

Ortofotomozaika umožňuje vizuálne identifikovať hranice porastov, rúbaniská, porastové medzery, poškodené plochy, lesné cesty, líniové prvky, výstavbu a zmeny využívania územia. Tretí cyklus ortofotomozaiky Slovenskej republiky pokrýva obdobie 2023 – 2025; dostupné priestorové rozlíšenie sa v jednotlivých cykloch pohybuje približne od 15 do 25 cm na obrazový prvok (bunku/pixel).

Ortofotomozaika je vhodná najmä na kontrolu a interpretáciu objektov väčších než jednotlivé palivové častice. Z obrazu možno rozpoznať napríklad súvislú krovinovú vegetáciu, ležiace kmene väčších rozmerov alebo plochy po ťažbe. Nemožno z nej však spoľahlivo určovať hmotnosť opadu, hrabanky alebo jemných vetvičiek pod korunami.

Z údajov ZBGIS možno využiť cestnú sieť, lesné a poľné cesty, železnice, vodné toky, vodné plochy, budovy a zastavané územia. Tieto prvky sú významné pri interpretácii možných iniciačných zdrojov, dostupnosti územia, prerušení palivovej kontinuity a pri hodnotení rozhrania lesa a zástavby.

Environmentálne údaje opisujú podmienky, ktoré ovplyvňujú vznik, produkciu, rozklad a vlhkosť lesného paliva. Zahŕňajú najmä meteorologické a klimatologické údaje, pôdne charakteristiky, hydrologické pomery, geologické podložie, chránené územia, vegetačné jednotky a informácie o poškodení alebo zdravotnom stave lesa.

Meteorologické a klimatologické údaje poskytuje predovšetkým Slovenský hydrometeorologický ústav. Pre mapovanie aktuálneho stavu paliva sú významné najmä:

- teplota vzduchu,
- relatívna vlhkosť vzduchu,
- úhrn a časový priebeh zrážok,
- rýchlosť a smer vetra,
- slnečný svit alebo globálne žiarenie,
- teplota pôdy,
- pôdna vlhkosť,
- výška a trvanie snehovej pokrývky,
- deficit tlaku vodnej pary,
- obdobie bez zrážok.

Slovenský hydrometeorologický ústav prevádzkuje sieť meteorologických a klimatologických staníc, archivuje pozorovania a poskytuje operatívne aj historické údaje a mapové produkty.

Staničné merania predstavujú bodové údaje. Priestorové vrstvy vytvorené interpoláciou alebo numerickým meteorologickým modelom majú vlastné efektívne informačné rozlíšenie a neistotu. Ich prevod na pracovnú mriežku 10 × 10 m nevytvára meteorologickú informáciu s desaťmetrovým rozlíšením. Jemná pracovná bunka iba umožňuje technické spojenie s ostatnými vrstvami.

Pôdne údaje sa používajú najmä na opis retenčnej schopnosti pôdy, textúry, hĺbky, skeletnatosti, obsahu organickej hmoty, hydrologického režimu a stanovištných podmienok. Pôdna vlhkosť ovplyvňuje živé palivo, rast podrastu a dlhodobé vysušovanie organických vrstiev. Samotný pôdny typ však nemožno použiť ako priamy ukazovateľ aktuálnej vlhkosti paliva.

Hydrologické údaje môžu zahŕňať vodné toky, mokrade, pramene, zaplavované územia, hĺbku podzemnej vody a modelované charakteristiky odtoku. Tieto vrstvy pomáhajú identifikovať vlhšie stanovištia, ale ich účinok na palivo sa mení počas roka a počas dlhších období sucha.

Údaje o ochrane prírody a biotopoch sú významné pri interpretácii vegetačných spoločenstiev a pri návrhu preventívnych opatrení. V chránených územiach môže byť hospodárenie s palivom obmedzené cieľmi ochrany prírody. Vysoké množstvo odumretého dreva tu nemožno automaticky interpretovať iba ako nežiaduci stav, pretože môže byť súčasťou prirodzeného vývoja ekosystému. Hodnotenie musí rozlíšiť ekologickú funkciu odumretého dreva a jeho konkrétny význam pre vznik a správanie požiaru.

Samostatnú skupinu tvoria údaje o vetrovom a snehovom poškodení, poškodení podkôrnym hmyzom, suchom, požiarom a ďalšími činiteľmi. Ich význam spočíva v rýchlej zmene množstva, charakteru a polohy paliva.

Priestorový záznam poškodenia má obsahovať najmenej:

- druh poškodenia,
- dátum alebo obdobie udalosti,
- rozsah poškodenej plochy,
- intenzitu poškodenia,
- podiel poškodených alebo odumretých stromov,
- informáciu o spracovaní dreva,
- dátum poslednej aktualizácie.

Údaj o poškodení bez časovej informácie je nedostatočný. Po poškodení podkôrnym hmyzom sa jemné palivo môže najskôr nachádzať v korunách, neskôr opadnúť na povrch a v ďalšom období sa môžu lámať vetvy a kmene. Palivové podmienky sa preto menia podľa času, ktorý od poškodenia uplynul.

Základným voľne dostupným zdrojom optických údajov je misia Sentinel-2 programu Copernicus. Multispektrálny senzor zaznamenáva 13 spektrálnych pásiem. Štyri pásma majú priestorové rozlíšenie 10 m, šesť pásiem 20 m a tri pásma 60 m. Kombinovaná konštelácia poskytuje za bežných podmienok opakované snímání približne v päťdňovom intervale.

Pri mapovaní paliva možno zo Sentinel-2 odvodiť najmä:

- vegetačné a vlhkostné spektrálne ukazovatele,
- podiel zelenej vegetácie,
- fenologický vývoj,
- rozdiely medzi ihličnatou a listnatou vegetáciou,
- stav bylinného a krovinného krytu na otvorených plochách,
- rozsah rúbanísk a poškodených porastov,
- zmenu vegetačného krytu,
- nepriamy odhad obsahu vody vo vegetácii.

Na analýzu sa majú prednostne používať atmosféricky korigované produkty úrovne 2A so spektrálnou odrazivosťou povrchu a s maskami oblačnosti. Jednotlivé pásma sa nesmú bez uvedenia postupu považovať za pôvodne desaťmetrové, ak boli iba prevzorkované z rozlíšenia 20 alebo 60 m. Produkty

Sentinel-2 úrovne 2A sú dostupné v rozlíšeníach 10, 20 a 60 m podľa príslušného pásma alebo odvodeného produktu.

Optické údaje sú obmedzené oblačnosťou, tieňmi, snehovou pokrývkou a tienením spodných a prízemných vrstiev korunami. V zapojenom lese spektrálna odozva pochádza prevažne z hornej časti korunovej vrstvy. Vzťah medzi spektrálnym ukazovateľom a množstvom povrchového paliva preto musí byť preukázaný terénnymi údajmi.

Pri analýze je vhodné používať časové rady, nie jednu snímku. Časové údaje umožňujú odlišiť trvalé drevinové porasty od sezónnej bylinnej vegetácie, identifikovať obdobie jesenného žltnutia listov a rozpoznať náhle zmeny po ťažbe alebo poškodení.

Sentinel-1 poskytuje údaje radarového snímania v pásme C. Radarový signál nie je závislý od slnečného osvetlenia a vo veľkej miere preniká oblačnosťou. Jednotlivé režimy snímania majú rozdielne rozlíšenie a šírku záberu; misia poskytuje údaje v niekoľkých polarizáciách.

Radarové údaje možno využiť na:

- sledovanie zmien štruktúry porastu,
- identifikáciu ťažby a poškodenia lesa,
- odhad vlhkosti otvorených povrchov,
- rozlíšenie niektorých typov vegetácie,
- doplnenie optických údajov v obdobiach s vysokou oblačnosťou,
- tvorbu viaczdrojových klasifikačných modelov.

Spätný rozptyl radarového signálu závisí od geometrie porastu, vlhkosti, polarizácie, uhla dopadu a drsnosti povrchu. V hustom lese je vzťah k povrchovému palivu nejednoznačný. Radarové údaje sa preto používajú najmä ako doplnkové vysvetľujúce premenné, nie ako samostatné priame meranie množstva paliva.

Letecké laserové skenovanie poskytuje trojrozmerné mračno bodov, z ktorého možno odvodiť výšku terénu, výšku porastu a vertikálne rozdelenie vegetácie. Pre Slovensko sú prostredníctvom GKÚ Bratislava dostupné klasifikované mračná bodov a odvodené produkty DMR a DMP.

Z mračna bodov možno odvodiť (Andersen et al. 2005; Campbell et al. 2018; Viedma et al. 2024):

- výšku porastu,
- korunovú štruktúru,
- vertikálny profil vegetácie,
- hĺbku korunovej vrstvy,
- výšku korunovej bázy,
- podiel bodov v jednotlivých výškových intervaloch,
- porastové medzery,
- nepriamy odhad objemovej hustoty korunového paliva,
- zmeny po ťažbe alebo poškodení.

Hustota a kvalita bodov v spodnej časti porastu závisia od hustoty horných korún, ročného obdobia snímania, letovej výšky, technických parametrov skenera a spôsobu klasifikácie. Letecké laserové

skenovanie preto nemusí spoľahlivo zachytiť všetky kroviny, nízke zmladenie a ležiace drevo pod hustou korunovou vrstvou.

Výška korunovej bázy odvodená z laserových údajov musí mať presne uvedenú definíciu. Môže ísť o najnižší zistený vegetačný bod, určitý percentil vertikálneho rozdelenia bodov alebo spodnú hranicu súvislej vrstvy. Tieto postupy poskytujú rozdielne hodnoty a nemožno ich bez overenia zamieňať.

Bezpilotné letecké systémy umožňujú podrobné snímanie menších území. Podľa použitého senzora možno vytvárať veľmi podrobné ortofotomozaiky, digitálne modely povrchu, trojrozmerné mračná bodov, multispektrálne vrstvy a teplotné mapy.

Využitie zahŕňa najmä:

- mapovanie rúbanísk a zvyškov po ťažbe,
- hodnotenie bylinného a krovinného krytu,
- identifikáciu poškodených alebo odumretých stromov,
- odhad výšky a pokryvnosti vegetácie,
- podrobné mapovanie rozhrania lesa a zástavby,
- dokumentovanie zmien po preventívnom zásahu,
- vytvorenie referenčných plôch na overenie družicových produktov.

Fotogrametrické mračno bodov vytvorené z obrazových snímok zachytáva predovšetkým viditeľný povrch. V zapojenom lese neposkytuje rovnakú informáciu o teréne a spodných vegetačných vrstvách ako laserové skenovanie. Pri interpretácii je preto potrebné rozlišovať fotogrametrický model povrchu od laserového mračna bodov s viacnásobnými odrazmi.

Pozemné laserové skenovanie, ručné mobilné skenovanie a lidarové senzory nesené pod korunovou vrstvou umožňujú detailne zachytiť kmene, vetvy, kroviny, zmladenie a časť ležiaceho dreva. Sú vhodné najmä na vytváranie podrobných trojrozmerných referenčných údajov a na overovanie parametrov odvodených z leteckého skenovania (Xi et al. 2023).

Ich využitie je obmedzené rozsahom meraného územia, zákrytmi objektov, pohybom vegetácie a náročnosťou spracovania. Nemajú nahradiť celoštátne mapovanie, ale poskytovať kalibračné a validačné údaje pre vybrané typy porastov.

Okrem pôvodných snímok Sentinel možno využiť odvodené produkty služby Copernicus Land Monitoring Service. Pre územie Európy sú dostupné vrstvy hustoty stromového korunového pokryvu, dominantného typu listov a typu lesa (listnaté, ihličnaté). Produkty hustoty stromového korunového pokryvu sú dostupné v rastrovom rozlíšení 10 a 100 m a vyjadrujú percentuálny podiel stromového pokryvu v bunke.

Tieto produkty sú vhodné na:

- celoštátne a regionálne porovnanie korunového pokryvu,
- doplnenie chýbajúcich lesníckych údajov,
- identifikáciu zmien stromového krytu,
- vstup do stratifikácie terénnych plôch.

Hustota stromového pokryvu nie je totožná s korunovou pokrývnosťou zistenou v teréne ani s objemovou hustotou korunového paliva. Ide o plošný ukazovateľ odvodený z družicových údajov. Jeho využitie pri modelovaní korunového paliva vyžaduje ďalšie údaje o výške, hĺbke korún, drevinovom zložení a jemnej korunovej biomase.

Pred spoločným spracovaním sa všetky vstupy prevedú do jednotného súradnicového referenčného systému a pracovnej mriežky. Pre spracovanie na území Slovenskej republiky možno použiť národný systém S-JTSK [JTSK03] alebo európsky systém ETRS89 podľa účelu databázy a požiadaviek na výmenu údajov.

Pracovná bunka 10 × 10 m predstavuje technickú jednotku spracovania. Efektívne informačné rozlíšenie jednotlivých vrstiev zostáva zodpovedajúce pôvodnému zdroju. Sentinel-2 pásma s pôvodným rozlíšením 20 m zostáva informačne dvadsaťmetrovm údajom aj po prevode do desaťmetrovej mriežky. Staničný meteorologický údaj zostáva bodovým pozorovaním alebo výsledkom regionálnej interpolácie, hoci je uložený v každej desaťmetrovej bunke.

Pri harmonizácii sa musia rešpektovať tieto zásady:

- kategórie sa prevzorkujú metódou najbližšieho suseda,
- spojité rastrové údaje možno podľa charakteru veličiny prevzorkovať bilineárnou alebo inou odborne vhodnou interpolačnou metódou,
- súčtové veličiny sa pri agregácii prepočítajú podľa plochy,
- identifikátory porastov sa nesmú interpolovať,
- chýbajúce údaje sa nesmú automaticky meniť na nulu,
- pri každej vrstve sa uchová pôvodné rozlíšenie a dátum platnosti,
- pri odvodených údajoch sa uchová verzia algoritmu a použitých vstupov.

Tabuľka 2 Odporúčaný prehľad vstupných údajov

Skupina údajov	Poskytovateľ	Produkt alebo databáza	Rok alebo verzia	Pôvodné rozlíšenie alebo miera	Typický formát	Spôsob využitia
opis porastov a hranice JPRL	Národné lesnícke centrum	Informačný systém lesného hospodárstva, programy starostlivosti o lesy	podľa obdobia platnosti konkrétneho PSL	porastová jednotka	vektor, databázová tabuľka	drevinové zloženie, vek, zakmenenie, výška, zásoba a priestorové vymedzenie
vykonané hospodárske opatrenia	Národné lesnícke centrum, obhospodarovateľ lesa	lesná hospodárska evidencia	rok vykonania opatrenia	JPRL alebo časť JPRL	databázová tabuľka, vektor	aktualizácia po ťažbe, obnove a pestovných zásahoch
lesnícko-typologické jednotky	Národné lesnícke centrum	lesnícko-typologická databáza	podľa aktuálnej verzie	lesnícko-typologická jednotka	vektor, databáza	stratifikácia stanovišť a interpretácia potenciálnych palivových podmienok

Skupina údajov	Poskytovateľ	Produkt alebo databáza	Rok alebo verzia	Pôvodné rozlíšenie alebo mierka	Typický formát	Spôsob využitia
digitálny model reliéfu	GKÚ Bratislava	DMR 5.0 alebo DMR 6.0	podľa cyklu leteckého laserového skenovania	DMR 5.0 → 1 m alebo DMR 6.0 → 0,5 m	GeoTIFF	výpočet výšky, sklonu, orientácie, oslnenia a topografickej polohy
digitálny model povrchu	GKÚ Bratislava	DMP 1.0 alebo DMP 2.0	podľa cyklu leteckého laserového skenovania	1 m alebo 0,5 m	GeoTIFF	pomocné odvodenie výšky objektov a vegetácie
mračno laserových bodov	GKÚ Bratislava	klasifikované údaje leteckého laserového skenovania	podľa dátumu snímania lokality	nepravidelné body; hustota podľa projektu	LAZ alebo LAS	vertikálna štruktúra vegetácie, výška porastu, korunové parametre
ortofotomozaika	GKÚ Bratislava	Ortofotomozaika Slovenskej republiky	cyklus 2023 – 2025 alebo aktuálnejší	približne 15 – 25 cm	TIFF, WMS	vizuálna interpretácia porastov, rúbanísk, ciest a zmien
základné topografické objekty	GKÚ Bratislava	ZBGIS	verzia platná ku dňu získania	podľa objektu a produktu	vektor, raster, WMS	cesty, železnice, vodné toky, budovy a ďalšie krajinné prvky
meteorologické údaje	Slovenský hydrometeorologický ústav	staničné a modelované meteorologické údaje	konkrétny dátum a čas	bodové stanice alebo mriežka modelu	tabuľka, raster, sieťová služba	odvodenie vlhkosti paliva a meteorologických scenárov
optické družicové snímky	Európska komisia, Európska vesmírna agentúra	Sentinel-2 MSI, úroveň 2A	dátum snímky	10, 20 a 60 m	SAFE, JPEG2000, cloudový raster	stratifikácia porastov a odvodenie vysvetľujúcich spektrálnych premenných
radarové družicové snímky	Európska komisia, Európska vesmírna agentúra	Sentinel-1 SAR	dátum snímky	podľa režimu snímania a typu produktu	SAFE, GeoTIFF po spracovaní	štruktúra a zmeny porastu, doplnenie optických údajov
hustota stromového pokryvu	Copernicus Land Monitoring Service	Tree Cover Density	referenčný rok produktu	10 m pre produkty od referenčného roku 2018; pri starších alebo agregovaných produktoch uviesť konkrétnu verziu	GeoTIFF	regionálne hodnotenie korunového pokryvu

Skupina údajov	Poskytovateľ	Produkt alebo databáza	Rok alebo verzia	Pôvodné rozlíšenie alebo mierka	Typický formát	Spôsob využitia
dominantný typ listov a typ lesa	Copernicus Land Monitoring Service	Dominant Leaf Type, Forest Type	referenčný rok produktu	10 m od referenčného roku 2018 pre Dominant Leaf Type a pri Forest Type 10 m od referenčného roku 2018, pričom minimálna mapovacia jednotka je 0,5 ha.	GeoTIFF	rozlíšenie základných skupín stromovej vegetácie
podrobné lokálne snímkovanie	prevádzkovateľ bezpilotného systému	RGB, multispektrálne, termálne alebo lidarové snímkovanie	dátum letu	podľa výšky letu a senzora	TIFF, LAS, LAZ, mračno bodov	lokálne mapovanie a overenie výsledkov
terénne údaje	riešiteľský tím	odberové plochy, transekt a merania porastu	dátum merania	plocha alebo transekt	tabuľka, bodová alebo plošná vrstva	kalibrácia, validácia a priame stanovenie palivových parametrov

Údaje uvedené v tabuľke sa majú pri každom konkrétnom spracovaní doplniť o presný názov súboru, identifikátor produktu, dátum stiahnutia, územný rozsah a licenčné podmienky. Označenie „aktuálna verzia“ nie je dostatočné na zabezpečenie reprodukovateľnosti. V archivovanej geodatabáze musí zostať zachovaná presná verzia, z ktorej bol výsledok vytvorený.

Lesnícke, topografické, environmentálne a diaľkovo snímané údaje vytvárajú navzájom sa dopĺňajúci systém. Lesnícke databázy poskytujú odborný opis porastu a hospodárskych zmien. Topografické údaje zabezpečujú polohový a reliéfny rámec. Environmentálne údaje vysvetľujú stanovištné a dynamické podmienky. Diaľkový prieskum Zeme umožňuje priestorovo súvisle sledovať vegetáciu a jej zmeny. Ich spoločné využitie je možné iba pri zachovaní informácie o pôvode, dátume, pôvodnom rozlíšení a neistote každého vstupu. Takto pripravené údaje vytvárajú základ na klasifikáciu paliva v lesnom prostredí.

2.5. Princípy klasifikácie paliva v lesnom prostredí

Klasifikácia lesného paliva predstavuje usporiadanie rozmanitých palivových podmienok do skupín, ktoré majú spoločné, vopred definované vlastnosti. Jej cieľom je zjednodušiť priestorovo a časovo premenlivý palivový komplex tak, aby ho bolo možné jednotne opisovať, mapovať, porovnávať a následne využívať pri hodnotení rizika vzniku požiaru, modelovaní správania požiaru a plánovaní preventívnych opatrení (Keane 2015; Aragoneses et al. 2023).

Klasifikácia nesmie byť založená iba na vzhľade vegetácie, dominantnej drevine alebo kategórii krajinej pokrývky. Rovnaký typ porastu môže obsahovať rozdielne množstvo opadu, bylinného a krovinného paliva, ležiaceho dreva a rebríkového paliva. Naopak, porasty s rozdielnym drevinovým zložením môžu mať z hľadiska povrchového šírenia požiaru podobné palivové vlastnosti. Základom klasifikácie preto musí byť skutočná štruktúra paliva a jeho funkcia pri horení, nie iba botanické alebo lesnícke zaradenie územia (Anderson 1982; Scott a Burgan 2005; Keane 2015).

V navrhovanej metodike sa rozlišujú tri úrovne opisu a zovšeobecnenia paliva:

- palivový komponent,
- palivový typ,
- palivový model.

Palivový komponent predstavuje konkrétnu súčasť palivového komplexu, napríklad ihličnatý alebo listnatý opad, odumretú trávku, živé byliny, kry, jemné vetvičky, ležiace kmene alebo jemné korunové palivo.

Palivový typ je opisná trieda charakterizovaná zložením, množstvom, štruktúrou a priestorovým usporiadaním paliva a jeho dominantnou funkciou pri iniciácii alebo šírení požiaru. Slúži na inventarizáciu, mapovanie a porovnávanie palivových podmienok a nepredstavuje automaticky konkrétny výpočtový palivový model.

Palivový model je účelovo zjednodušený súbor číselných parametrov používaný v konkrétnom modeli správania požiaru. Obsahuje iba tie charakteristiky, ktoré príslušný výpočtový postup vyžaduje. Palivový typ preto nemožno automaticky považovať za palivový model a jeden palivový typ môže byť podľa aktuálneho stavu alebo účelu modelovania zastúpený viacerými palivovými modelmi (Rothermel 1972; Anderson 1982; Scott a Burgan 2005).

Pred vytvorením tried sa musí určiť, na aký účel bude klasifikácia slúžiť. Univerzálna klasifikácia vhodná pre všetky úlohy neexistuje, pretože jednotlivé aplikácie vyžadujú rozdielne vlastnosti paliva.

Pre hodnotenie rizika vzniku požiaru je rozhodujúca najmä prítomnosť jemného iniciačne významného paliva, jeho vlhkosť, plošná kontinuita a kontakt s možným iniciačným zdrojom. Triedy musia preto rozlišovať palivové situácie podľa ich schopnosti prijať iniciáciu a udržať počiatočné horenie.

Pre modelovanie povrchového požiaru je potrebné klasifikovať palivo podľa dominantnej vrstvy, množstva paliva, veľkostného zloženia, hĺbky palivového lôžka, pomeru živých a odumretých častí a ďalších parametrov požadovaných použitým výpočtovým modelom (Rothermel 1972; Scott a Burgan 2005).

Pre hodnotenie vertikálneho prechodu sa klasifikácia musí rozšíriť o rebríkové palivo a vertikálnu kontinuitu vegetácie. Pri hodnotení korunového požiaru sa dopĺňajú charakteristiky výšky korunovej bázy, objemovej hustoty a horizontálnej kontinuity korunového paliva.

Pre plánovanie preventívnych opatrení musí klasifikácia umožniť identifikovať palivovú vrstvu, ktorú možno zásahom ovplyvniť. Trieda má preto vyjadrovať nielen potenciálne správanie požiaru, ale aj dominantný palivový komponent a jeho priestorovú polohu.

Základným princípom klasifikácie je funkčné členenie podľa polohy a úlohy paliva pri požiari. V navrhovanej metodike sa preto samostatne vedie podpovrchové, povrchové, rebríkové a korunové palivo.

Podpovrchové palivo zahŕňa najmä čiastočne alebo výrazne rozložené organické vrstvy, korene a ďalší organický materiál nachádzajúci sa pod povrchom. Jeho význam sa spája predovšetkým s tlejúcim horením, dlhým trvaním požiaru a možnosťou opätovného vzplanutia.

Povrchové palivo zahŕňa opad, hrabanku, byliny, tráv, nízke kry a ležiaci drevný materiál. Ide o vrstvu, v ktorej najčastejšie vzniká a šíri sa počiatočný požiar. Pri jej klasifikácii musí byť určené, ktorý palivový komponent riadi šírenie čela požiaru.

Rebríkové palivo tvoria palivové prvky, ktoré zabezpečujú vertikálne prepojenie medzi povrchom a korunovou vrstvou. Môže ísť o vysokú trávu, kry, prirodzené zmladenie, potlačené stromy, suché spodné vetvy alebo viacvrstvové koruny.

Korunové palivo zahŕňa jemné živé a odumreté časti korún stromov, ktoré sa môžu zapojiť do plameňového horenia. Jeho klasifikácia musí zohľadňovať nielen množstvo, ale aj vertikálne a horizontálne usporiadanie.

Jedna plocha môže obsahovať všetky uvedené vrstvy. Klasifikačný systém ich preto nemá zlúčiť do jedinej nerozlišenej triedy. V navrhovanej metodike sa preto pre každú priestorovú jednotku vedie dominantná trieda povrchového paliva a samostatne charakteristika podpovrchového, rebríkového a korunového paliva.

Pri klasifikácii povrchového paliva sa má za dominantnú považovať zložka, ktorá za stanovených podmienok riadi postup čela požiaru. Nemusí ísť o komponent s najvyššou celkovou hmotnosťou (Anderson 1982; Scott a Burgan 2005).

Porast môže obsahovať veľké množstvo hrubého ležiaceho dreva, ale čelo požiaru sa môže šíriť najmä jemným opadom alebo suchou trávou. Hrubé drevo sa zapája neskôr, predlžuje horenie a zvyšuje náročnosť dohášania. Klasifikácia založená iba na celkovej hmotnosti by preto nesprávne označila hrubé drevo za dominantný nositeľ šírenia.

Pre navrhovanú klasifikáciu lesného paliva Slovenskej republiky sa ako základné kategórie dominantného povrchového paliva navrhujú najmä:

- trávu a jemné bylinné palivo,
- krovínové palivo,
- listnatý opad,
- ihličnatý opad,
- zmes opadu a bylinného podrastu,
- zmes opadu a krovín,
- jemné zvyšky po ťažbe alebo poškodení porastu,
- povrchový komplex s vysokým zastúpením ležiaceho dreva.

Sezónna zmena dominantného nositeľa šírenia nemá meniť základné namerané charakteristiky palivového profilu; mení iba funkčnú interpretáciu alebo odvodené zaradenie priestorovej jednotky pre dané obdobie. Napríklad živá bylinná vegetácia môže počas vegetačného obdobia spomaľovať povrchové šírenie, ale po vyschnutí a odumretí sa môže stať jeho dominantným nositeľom.

Pre podmienky Slovenskej republiky sa navrhuje hierarchický klasifikačný systém, ktorý umožňuje postupovať od všeobecnej funkčnej vrstvy cez palivový typ až k podrobným fyzikálnym parametrom a podľa účelu aj k odvodenému palivovému modelu. Hierarchická organizácia umožňuje používať spoločný klasifikačný rámec pri celoštátnom, regionálnom aj lokálnom mapovaní, pričom podrobnosť výsledku sa prispôsobuje kvalite a priestorovej podpore dostupných údajov. Hierarchický a viacúčelový princíp sa uplatňuje aj v súčasnej európskej klasifikácii paliva, ktorá rozlišuje viac úrovní a pri lesoch osobitne reprezentuje nadúrovňovú a podrastovú palivovú vrstvu (Aragoneses et al. 2023).

Klasifikácia sa v navrhovanej metodike nevykonáva ako prvý krok. Najskôr sa pre priestorovú jednotku vytvorí súbor meraných, odvodených a modelovaných charakteristík palivového komplexu. Palivový typ a prípadný palivový model sa z týchto údajov určujú až následne podľa transparentných klasifikačných pravidiel.

Pôvodné spojené parametre sa v geodatabáze zachovávajú aj po priradení triedy. Zmena hraníc klasifikácie alebo použitého modelovacieho systému tak nevyžaduje opätovné vytváranie pôvodnej palivovej informácie.

Prvá úroveň klasifikácie vyjadruje polohu paliva:

- podpovrchové palivo,
- povrchové palivo,
- rebríkové palivo,
- korunové palivo.

Druhá úroveň rozlišuje dominantnú palivovú skupinu. Pri povrchovom palive možno rozlíšiť:

- trávové a bylinné palivo,
- krovinové palivo,
- palivo tvorené opadom,
- drevné palivo,
- zmiešané palivové komplexy,
- plochy bez významnej súvislej palivovej vrstvy.

Tretia úroveň vyjadruje podrobnejšie zloženie. Palivo tvorené opadom možno rozdeliť na listnaté, ihličnaté a zmiešané. Drevné palivo možno členiť podľa pôvodu, rozmerového zastúpenia, stupňa rozkladu a priestorového usporiadania. Krovinové palivo možno rozlíšiť podľa výšky, pokryvnosti a podielu živých a odumretých častí.

Štvrtá úroveň obsahuje kvantitatívne triedy, napríklad nízke, stredné a vysoké množstvo paliva, plytkú a hlbokú palivovú vrstvu alebo prerušovanú a súvislú horizontálnu kontinuitu.

Takáto hierarchia umožňuje zachovať základné členenie aj tam, kde nie sú dostupné podrobné údaje. Plocha môže byť na celoštátnej úrovni zaradená do všeobecnej opadovej triedy a na úrovni podrobného prieskumu ďalej rozdelená podľa dominantnej dreviny, množstva paliva, hrúbky a stupňa rozkladu.

Každá trieda musí mať jednoznačný názov, odbornú definíciu a súbor merateľných alebo pozorovateľných kritérií. Nestačí označenie „nízke palivo“, „hustý porast“ alebo „vysoké množstvo dreva“, ak nie je určené, čo sa týmito pojmami rozumie.

Definícia triedy má obsahovať najmenej:

- dominantný palivový komponent,
- polohu v palivovom komplexe,
- rozsah množstva paliva,
- výšku alebo hĺbku vrstvy,
- pokryvnosť,
- podiel živých a odumretých častí,
- horizontálnu kontinuitu,
- prípadne vertikálnu kontinuitu,
- sezónne podmienky platnosti,
- spôsob terénneho a priestorového určenia.

Hranice medzi triedami musia byť uložené v samostatnom číselníku alebo dátovom slovníku a musia byť verziované. Ak boli stanovené expertným rozhodnutím, musí byť uvedené ich odborné zdôvodnenie; ak boli odvodené zo súboru meraní, musí byť uvedený spôsob kalibrácie a overenia.

Majú byť stanovené tak, aby boli reprodukovateľné. Ak sa používa pokryvnosť, musí byť uvedené, či ide o zvislý priemet, vizuálny odhad alebo hodnotu odvodenú zo snímky. Ak sa používa množstvo paliva, musí byť uvedené, či ide o suchú hmotnosť, ktoré komponenty sú zahrnuté a akou metódou bola hodnota stanovená.

Triedy nemajú byť vytvárané iba tak, aby mali približne rovnaké zastúpenie v dátovom súbore. Ich hranice musia mať vecný význam vo vzťahu k zmene vlastností palivového komplexu alebo k jeho predpokladanému správaniu.

Opisná klasifikácia zachytáva reálny palivový komplex vo väčšej podrobnosti. Je vhodná na inventarizáciu, mapovanie, sledovanie zmien a plánovanie manažmentu. Môže obsahovať viac komponentov a samostatné charakteristiky jednotlivých vrstiev.

Modelová klasifikácia zaraďuje územie do palivových modelov používaných v konkrétnom výpočtovom systéme. Jej cieľom nie je úplne opísať porast, ale vybrať taký súbor parametrov, ktorý primerane reprodukuje sledované správanie požiaru.

Štandardné zahraničné palivové modely sa v navrhovanom systéme nepovažujú za primárnu klasifikáciu slovenských lesov. Používajú sa ako modelový referenčný rámec, ku ktorému možno domáci palivový typ priradiť až po porovnaní jeho meraných parametrov a dominantného nositeľa šírenia (Anderson 1982; Scott a Burgan 2005).

Štandardné modely Scotta a Burgana (2005) obsahujú 40 modelov povrchového paliva rozdelených do skupín podľa dominantného nositeľa šírenia, napríklad trávové, trávovo-krovinové, krovinové, opadové, opadovo-krovinové a zvyškové palivá. Sú vytvorené na použitie s Rothermelovým modelom povrchového šírenia a predstavujú rozšírenie pôvodných trinástich modelov.

Tieto modely nemožno priradovať iba podľa vizuálnej podobnosti alebo názvu porastu. Rozhodujúce je, ktorá palivová vrstva riadi šírenie, aké je množstvo paliva v jednotlivých veľkostných triedach, aká je hĺbka vrstvy a aký je podiel živých a odumretých častí.

Zahraničný štandardný model možno použiť v podmienkach Slovenska iba vtedy, ak jeho parametre primerane zodpovedajú domácim terénnym údajom a poskytuje prijateľné výsledky pri modelovaní. Ak sa skutočný palivový komplex výrazne odlišuje, je potrebné parameter modelu upraviť alebo vytvoriť miestny palivový model. Postupy systémov BEHAVE a BehavePlus umožňujú štandardné modely testovať a podľa terénnych údajov vytvárať alebo upravovať vlastné modely.

Palivové triedy možno vytvárať tromi základnými prístupmi: asociáciou, klasifikáciou meraných vlastností a abstrakciou podľa modelového správania.

Pri asociačnom prístupe sa palivo priraduje podľa vegetačného typu, drevinového zloženia, stanovišťa alebo vývojového štádia porastu. Tento postup je jednoduchý a využíva dostupné lesnícke údaje. Jeho obmedzením je, že rovnaký vegetačný typ môže obsahovať veľmi rozdielne množstvo paliva a rozličné štruktúry.

Pri klasifikácii meraných vlastností sa triedy vytvárajú podľa priamo zistených palivových parametrov. Použiť možno napríklad palivovú množstvo, pokryvnosť, hĺbku vrstvy, zastúpenie veľkostných tried, výšku podrastu a množstvo ležiaceho dreva. Tento prístup lepšie zachytáva skutočný stav, vyžaduje však rozsiahle terénne údaje.

Pri abstrakcii podľa modelového správania sa palivové komplexy združujú podľa podobnosti predpokladanej rýchlosti šírenia, intenzity, dĺžky plameňa alebo spotreby paliva. Výsledné triedy môžu byť vhodné pre konkrétny model, nemusia však zachovať dostatočné informácie na iné účely. Odborné prehľady preto upozorňujú, že palivový komplex nemožno redukovať iba na triedu používanú jedným modelom správania požiaru.

Pre navrhovaný systém je vhodné kombinovať všetky tri prístupy. Vegetačné a lesnícke údaje sa použijú na základnú stratifikáciu, terénne údaje na opis skutočných vlastností a modelové výpočty na overenie, či vytvorené triedy poskytujú dostatočne rozdielne a odborne interpretovateľné správanie.

Lesné porasty často nemožno zaradiť do jednej jednoduchej triedy. Povrchová vrstva môže súčasne obsahovať opad, trávnu, kroviny a ležiace drevo. Pri klasifikácii je potrebné určiť, či ide o jeden zmiešaný komplex, mozaiku samostatných tried alebo vertikálne prekrytie viacerých vrstiev.

Za zmiešaný palivový komplex možno považovať situáciu, keď sa viaceré komponenty nachádzajú na rovnakej ploche a spoločne ovplyvňujú šírenie. Napríklad opad môže vytvárať základnú súvislú vrstvu, cez ktorú prerastá odumretá tráva alebo nízke kroviny.

Za mozaiku možno považovať územie, v ktorom sa jednotlivé palivové typy nachádzajú v oddelených škvrách. Priestorová jednotka nemá byť automaticky zaradená podľa väčšinovej triedy, ak menšinová, ale súvislá palivová zložka vytvára cestu rýchleho šírenia.

Pri vertikálnom prekrytí treba samostatne zaznamenať povrchovú, rebríkovú a korunovú vrstvu. Plocha môže mať rovnaký povrchový palivový typ ako iný porast, ale výrazne odlišný potenciál prechodu do korún.

Klasifikačný záznam má preto umožniť uložiť:

- dominantnú povrchovú triedu,
- sekundárnu povrchovú zložku,

- podiel jednotlivých tried v bunke alebo objekte,
- triedu rebríkového paliva,
- triedu korunového paliva,
- informáciu o sezónnej zmene dominantnej zložky.

Niektoré palivové komplexy menia svoje správanie podľa sezónneho podielu živého a odumretého paliva. Typickým príkladom sú trávové a bylinné vrstvy. Počas vegetačného obdobia môže byť významná časť biomasy živá a vlhká, zatiaľ čo po senescencii sa presúva do odumretej a ľahšie zapáliteľnej zložky.

Statická trieda má opisovať základný druh a štruktúru paliva. Dynamický stav sa má vyjadriť samostatným atribútom alebo časovou vrstvou, napríklad podielom živej a odumretej bylinnej biomasy, aktuálnou vlhkosťou alebo fenologickou fázou.

Dynamické palivové modely Scotta a Burgana upravujú podiel množstva paliva medzi živou a odumretou bylinnou zložkou v závislosti od stupňa vyschnutia vegetácie. Tento princíp je významný pri klasifikácii lúk, pasienkov, rúbanísk, lesných medzier a riedkych porastov s výraznou bylinnou vrstvou.

Dynamická zmena nesmie viesť k tomu, že sa každý deň vytvorí úplne nová základná palivová mapa. Stabilná trieda sa zachová a aktualizuje sa iba stavová premenná, ktorá ovplyvňuje jej momentálne správanie.

Výsledná trieda závisí od veľkosti hodnotenej jednotky. Malá terénna plocha môže byť palivovo homogénna, zatiaľ čo rastrová bunka alebo porastový polygón môže obsahovať viacero palivových typov.

Pri klasifikácii sa preto musí určiť minimálna mapovacia jednotka. Tá má zodpovedať účelu mapy, rozlíšeniu vstupných údajov a veľkosti palivových útvarov, ktoré majú význam pre šírenie požiaru.

Pri pracovnom rastru 10 × 10 m sa môže každej bunke priradiť dominantná trieda, ale súčasne je vhodné evidovať podiel ostatných tried a mieru vnútornej heterogenity. Ak je bunka tvorená približne rovnakým podielom dvoch odlišných typov, označenie jednou triedou môže byť zavádzajúce.

Na úrovni JPRL sa majú uvádzať:

- dominantná palivová trieda,
- podiel plochy jednotlivých tried,
- priestorové usporiadanie tried,
- podiel súvislých plôch s vyšším množstvom paliva,
- miera heterogenity,
- prítomnosť rebríkového a korunového paliva.

Hodnotenia viacerých existujúcich klasifikačných systémov ukázali, že vysoká variabilita v množstve paliva v rámci jednej triedy a nesúlad medzi mierkou terénneho merania a mapovou jednotkou môžu výrazne znížiť presnosť klasifikácie.

Terénna klasifikácia sa vykonáva podľa priamo pozorovaných a meraných vlastností. Poskytuje referenčný údaj, ale je priestorovo obmedzená.

Klasifikácia z údajov diaľkového prieskumu Zeme využíva spektrálne, radarové, výškové a štruktúrne premenné. Výsledná trieda je predikciou založenou na podobnosti so vzorkami použitými na vytvorenie modelu.

Optické snímky sú vhodné najmä na rozlíšenie vegetačného krytu, fenologických rozdielov a otvorených palivových plôch. Radarové údaje dopĺňajú informácie o štruktúre a vlhkosti vegetácie. Laserové skenovanie poskytuje údaje o výške a vertikálnom rozdelení porastu. Povrchové palivo pod zapojenými korunami však zostáva pri všetkých leteckých a družicových metódach ťažko pozorovateľné.

Súčasný prehľad klasifikácie palivových typov zdôrazňuje význam kombinácie viacerých senzorov, časových radov a metód strojového učenia. Zároveň poukazujú na nedostatok terénnych údajov, obmedzenú prenositeľnosť klasifikátorov medzi regiónmi a časté zamieňanie vegetačných a palivových tried.

Klasifikátor vytvorený pre jeden región preto nemožno bez overenia aplikovať na celé územie Slovenskej republiky. Tréninový súbor musí obsahovať reprezentatívne zastúpenie domácich drevinových, stanovištných, porastových a palivových podmienok.

Priradenie palivovej triedy sa má uskutočniť podľa vopred stanoveného rozhodovacieho postupu. Ten môže mať podobu rozhodovacieho stromu, bodovacieho systému alebo štatistického klasifikátora.

Základný rozhodovací postup môže pozostávať z týchto krokov:

- určenie prítomnosti a typu povrchovej palivovej vrstvy,
- identifikácia dominantného nositeľa šírenia,
- určenie sekundárnych palivových komponentov,
- stanovenie množstva paliva a hĺbky vrstvy paliva,
- určenie podielu živých a odumretých zložiek,
- hodnotenie horizontálnej kontinuity,
- samostatné hodnotenie rebríkového paliva,
- samostatné hodnotenie korunového paliva,
- priradenie opisnej palivovej triedy,
- prípadné priradenie štandardného alebo miestneho palivového modelu.

Ak plocha nespĺňa jednoznačne kritériá žiadnej existujúcej triedy, nemá byť násilne zaradená do najbližšej kategórie. Môže byť označená ako prechodná alebo zmiešaná trieda, prípadne sa môže vytvoriť nová miestna trieda, ak sa daná situácia opakuje na dostatočne veľkej ploche.

Každá trieda má mať krátky a jednoznačný kód, ktorý vyjadruje jej polohu, dominantný komponent a podrobnejšiu charakteristiku. Kódovanie musí byť stabilné a nezávislé od názvu používaného v konkrétnej softvérovej aplikácii.

Tabuľka 3 Príklad základného kódovania povrchových palivových skupín

Kód	Základná palivová skupina	Dominantný nositeľ šírenia
PP-T	trávové a bylinné palivo	jemná živá alebo odumretá tráva a byliny
PP-K	krovinové palivo	jemné živé a odumreté časti krov
PP-OL	listnatý opad	suché listy a drobné vetvičky

PP-OI	ihličnatý opad	ihličie a drobné vetvičky
PP-OZ	zmiešaný opad	zmes listnatého a ihličnatého opadu
PP-D	drevné palivo	zvyšky po ťažbe, poškodení alebo prirodzenom odumieraní
PP-Z	zmiešaný povrchový komplex	dve alebo viaceré spoločne pôsobiace zložky
PP-N	nesúvislé alebo nevýznamné palivo	palivová vrstva nepodporuje súvislé povrchové šírenie

K základnému kódu možno doplniť číselnú triedu množstva paliva, jeho hĺbky alebo kontinuity. Napríklad kód PP-OI-2 môže označovať ihličnatý opad so stredným množstvom paliva. Význam každej číselnej triedy však musí byť definovaný konkrétnymi intervalmi.

Kód opisnej triedy sa nemá zamieňať s označením štandardného modelu Scotta a Burgana, napríklad GR, GS, SH, TU, TL alebo SB. Prevod medzi domácou opisnou triedou a výpočtovým palivovým modelom sa má viesť v samostatnej prevodnej tabuľke.

Klasifikácia sa musí overiť z tematického, priestorového a aplikačného hľadiska.

Tematické overenie posudzuje, či sa plochy zaradené do rovnakej triedy skutočne vyznačujú podobným zložením, množstvom a štruktúrou paliva.

Priestorové overenie kontroluje správnosť priradenia tried v mape pomocou nezávislých terénnych plôch, podrobných ortofotosnímkov alebo lidarových údajov.

Aplikačné overenie posudzuje, či triedy poskytujú zmysluplne rozdielne výsledky pri použití v modeli správania požiaru alebo pri plánovaní opatrení. Ak dve triedy majú rozdielny názov, ale pri všetkých relevantných scenároch poskytujú takmer rovnaké výsledky a nevyžadujú odlišný manažment, ich oddelenie nemusí byť účelné.

Pri klasifikačných mapách sa má vyhodnotiť matica zámen, celková presnosť, presnosť používateľa a tvorcu pre jednotlivé triedy a vyvážené ukazovatele vhodné aj pre triedy s nízkym zastúpením. Celková presnosť sama osebe nestačí, pretože môže zakryť nízku úspešnosť menej častých, ale významných palivových tried.

Palivová trieda sa musí aktualizovať po zmene dominantného komponentu, množstve paliva alebo jeho priestorovej štruktúry. Aktualizácia je potrebná najmä po:

- ťažbe a pestovnom zásahu,
- vetrovom alebo snehovom poškodení,
- poškodení podkôrnym hmyzom,
- odumieraní spôsobenom suchom,
- požiarí,
- spracovaní alebo odstránení zvyškov,
- zarastaní rúbanísk,
- výraznej zmene bylinného alebo krovinného podrastu,
- zásahu zameranom na zníženie množstva paliva.

Krátkodobá zmena vlhkosti spravidla nemení základnú opisnú triedu, ale mení aktuálny stav paliva a prípadne výber dynamického palivového modelu. Naopak, odstránenie krovinovej vrstvy alebo vznik súvislej vrstvy zvyškov po ťažbe predstavujú zmenu samotného palivového typu.

Každá aktualizácia musí zachovať dátum, dôvod zmeny, použitý zdroj údajov a predchádzajúcu triedu. Takto možno sledovať vývoj palivových podmienok a vyhodnocovať účinnosť vykonaných opatrení.

Klasifikácia paliva v lesoch Slovenskej republiky má byť založená na týchto princípoch:

- Funkčný princíp – palivo sa klasifikuje podľa jeho úlohy pri iniciácii, povrchovom šírení, vertikálnom prechode a korunovom horení.
- Viacvrstvový princíp – povrchové, podpovrchové, rebríkové a korunové palivo sa hodnotia samostatne.
- Princíp dominantného nositeľa šírenia – povrchová trieda sa neurčuje podľa najväčšej celkovej biomasy, ale podľa zložky radiacej postup čela požiaru.
- Hierarchický princíp – systém umožňuje všeobecné aj podrobné zaradenie podľa dostupnosti údajov a účelu mapovania.
- Kvantitatívny princíp – hranice tried sa podľa možností opierajú o merateľné parametre a jednoznačne určené intervaly.
- Priestorový princíp – klasifikácia zohľadňuje horizontálnu a vertikálnu kontinuitu a vnútornú heterogenitu mapovanej jednotky.
- Časový princíp – odlišuje stabilnú palivovú triedu od dynamického stavu vlhkosti a fenologického vývoja.
- Princíp oddelenia opisu a modelu – opisná palivová trieda sa vedie oddelene od palivového modelu použitého na výpočet správania požiaru.
- Princíp regionálneho overenia – zahraničné klasifikácie a štandardné modely sa používajú až po porovnaní s domácimi terénnymi údajmi.
- Princíp transparentnosti – pri každom zaradení je známy zdroj údajov, rozhodovacie pravidlo, časová platnosť a miera neistoty.

Takto navrhnutá klasifikácia umožní zachovať odborný opis skutočného palivového komplexu a súčasne vytvoriť väzbu na výpočtové palivové modely. Jej úlohou nie je zaradiť každý lesný porast do jednej nemennej kategórie, ale systematicky vyjadriť dominantné palivové zložky, ich množstvo, usporiadanie a funkciu pri požiari. Na základe týchto princípov možno následne vybrať konkrétne parametre povrchového a korunového paliva, ktoré budú predmetom terénneho zisťovania a geopriestorového spracovania.

2.6. Výber hodnotených parametrov povrchového, rebríkového a korunového paliva

Výber hodnotených parametrov predstavuje rozhodujúci krok medzi všeobecnou klasifikáciou lesného paliva a jeho terénnym a geopriestorovým spracovaním. Hodnotené charakteristiky musia dostatočne opísať zloženie, množstvo a priestorovú štruktúru palivového komplexu, ale súčasne musia byť merateľné, odborne jednoznačné a využiteľné v geografických informačných systémoch a modeloch správania požiaru.

Do hodnotenia nie je účelné zaradiť všetky vlastnosti organickej hmoty nachádzajúcej sa v lesnom poraste. Takýto postup by vytvoril rozsiahly súbor údajov bez jednoznačnej väzby na sledované procesy. Vybrané parametre preto musia mať preukázateľný význam aspoň pre jednu z nasledujúcich oblastí:

- hodnotenie podmienok iniciácie a počiatočného udržania horenia,
- opis šírenia povrchového požiaru,
- odhad intenzity a trvania horenia,
- hodnotenie vertikálneho prechodu požiaru do korunovej vrstvy,
- posúdenie možnosti udržania aktívneho korunového požiaru,
- klasifikáciu palivových typov a tvorbu palivových modelov,
- návrh, priestorové umiestnenie a kontrolu účinnosti preventívnych opatrení.

V navrhovanej metodike sa preto nevyberajú parametre podľa toho, či sú jednoducho dostupné v existujúcej databáze, ale podľa ich funkcie v palivovom komplexe a podľa možnosti ich jednoznačne merať, odvodiť alebo modelovať.

Súbor parametrov musí umožniť odlišiť priamo namerané vlastnosti od hodnôt odvodených z lesníckych údajov, laserového skenovania, družicového snímania alebo priestorového modelovania. Pri každom parametri sa preto musí uviesť jeho odborná definícia, jednotka, dátový typ, priestorová a časová platnosť, prednostný a náhradný zdroj údajov, metóda určenia a spôsob overenia.

Parameter sa do metodického rámca zaraďuje vtedy, ak spĺňa väčšinu nasledujúcich kritérií:

- má jednoznačný fyzikálny, ekologický alebo modelový význam;
- možno ho zisťovať opakovateľnou terénou alebo diaľkovo snímanou metódou;
- možno ho vyjadriť v štandardizovanej jednotke alebo jednoznačne definovanej triede;
- vykazuje priestorovú premenlivosť významnú pre mapovanie;
- je využiteľný pri klasifikácii paliva alebo modelovaní správania požiaru;
- možno ho uložiť, aktualizovať a priestorovo analyzovať v geodatabáze;
- možno pri ňom vyjadriť zdroj a mieru neistoty;
- jeho zisťovanie je uskutočniteľné v primeranom územnom, časovom a finančnom rozsahu.

Výber nesmie byť založený iba na dostupnosti určitého zdroja údajov. Skutočnosť, že niektorú charakteristiku možno jednoducho odvodiť z družicovej snímky alebo lesníckej databázy, ešte neznamena, že ide o rozhodujúci parameter paliva. Naopak, niektoré požiarne významné vlastnosti, napríklad množstvo opadu, hĺbka hrabanky alebo vertikálna kontinuita podrastu, si vyžadujú priame terénne zisťovanie, hoci ich plošne súvislé mapovanie je náročnejšie.

Parametre sa členia podľa priestorovej polohy paliva a podľa funkcie, ktorú plnia pri požiaroch. Rozlišujú sa:

- parametre povrchového paliva,
- parametre podpovrchových organických vrstiev,
- parametre bylinného a krovinného paliva,
- parametre rebríkového paliva,
- parametre korunového paliva,
- dynamické parametre vlhkosti a aktuálneho stavu paliva,

- pomocné porastové a priestorové parametre.

Rebríkové palivo sa v metodike hodnotí ako samostatná funkčná vrstva medzi povrchovým a korunovým palivom. Jeho opis sa neopiera iba o jednu priemernú výšku korunovej bázy, ale o vertikálny profil vegetácie. Medzi základné hodnotené parametre patria výškový rozsah rebríkového paliva, počet obsadených výškových vrstiev, veľkosť najväčšej vertikálnej medzery, pokryvnosť vegetácie v jednotlivých výškových pásmach a funkčné prepojenie s hlavnou korunovou vrstvou (Viedma et al. 2024).

Dynamické charakteristiky, najmä vlhkosť paliva a podiel živej a odumretej bylinnej biomasy, sa neukladajú ako nemenná vlastnosť palivového typu. Pripájajú sa ako časovo označené hodnoty ku konkrétnemu dátumu, obdobiu alebo modelovému scenáru.

Povrchové palivo zahŕňa organický materiál nachádzajúci sa na povrchu pôdy a nízku vegetáciu, ktorá sa môže zapojiť do povrchového horenia. Patria sem najmä opad, hrabanka, machy a lišajníky, bylinné a trávové palivo, nízke kroviny, jemné a hrubé ležiace drevo, kôra, šišky a materiál ponechaný po ťažbe alebo poškodení lesného porastu.

Pri výbere parametrov sa kladie osobitný dôraz na jemné palivo, ktoré sa rýchlo zahrieva, vysušuje a zapája do počiatočného horenia. Hrubšie palivo sa hodnotí samostatne, pretože ovplyvňuje najmä množstvo uvoľnenej energie, trvanie horenia, tlenie, stabilitu požiariska a náročnosť dohášania.

Dominantný nositeľ povrchového šírenia vyjadruje palivový komponent, ktorým sa pri stanovených podmienkach prednostne šíri čelo požiaru. Môže ním byť:

- suchá tráva alebo bylinné zvyšky,
- krovinné palivo,
- ihličnatý opad,
- listnatý opad,
- zmiešaný opad,
- jemné drevné zvyšky,
- zmiešaný povrchový palivový komplex.

Dominantný nositeľ sa neurčuje podľa najvyššej celkovej hmotnosti paliva, ale podľa zložky zabezpečujúcej súvislé šírenie čela požiaru. Porast s veľkým množstvom hrubého ležiaceho dreva môže mať ako dominantný nositeľ povrchového šírenia stále jemnú vrstvu ihličia, listov alebo suchej trávy.

Tento parameter má charakter kategórií. Tvorí základ opisnej klasifikácie povrchového paliva a následného priradenia alebo vytvorenia palivového modelu.

Množstvo paliva vyjadruje suchú hmotnosť paliva pripadajúcu na jednotku plochy (20):

$$w = \frac{m_s}{A} \quad (20)$$

kde:

w – množstvo paliva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

m_s – suchá hmotnosť paliva (kg)

A – plocha, z ktorej bolo palivo odobraté alebo pre ktorú bolo jeho množstvo odvodené (m^2)

Množstvo paliva sa nemá určovať iba ako jedna celková hodnota. Potrebne je rozdeliť ju najmenej podľa:

- palivového komponentu,
- živého a odumretého stavu,
- veľkostnej alebo časovej triedy,
- polohy v palivovom komplexe.

Priestorová vrstva celkového množstva povrchového paliva môže slúžiť ako súhrnný výstup, v geodatabáze však musia zostať zachované aj hodnoty jednotlivých zložiek. Celkové množstvo môže pozostávať z veľmi rozdielneho podielu jemného a hrubého paliva, čo vedie k odlišnému správaniu požiaru.

Množstvo jemného odumretého paliva patrí medzi základné parametre hodnotenia podmienok iniciácie a povrchového šírenia. Zahŕňa najmä suché ihličie, listy, tráv, bylinné zvyšky, drobné časti kôry a najtenšie vetvičky.

Jemné palivové častice majú vysoký pomer povrchu k objemu a rýchlo vymieňajú vlhkosť s okolitým vzduchom. Ich množstvo a horizontálna kontinuita preto významne ovplyvňujú, či sa miestne zapálenie prenesie na susedné častice a vytvorí samostatne sa šíriace čelo požiaru.

Množstvo jemného odumretého paliva sa musí viesť samostatne od celkového množstva povrchovej biomasy. Pri použití časových tried sa palivo zaraďuje podľa charakteristického času odozvy jeho vlhkosti na zmenu atmosférických podmienok. Hranice veľkostných a časových tried musia zodpovedať metodike použitého modelu správania požiaru.

Stredné a hrubé ležiace drevo má spravidla menší význam pri rýchlej iniciácii požiaru, môže však významne prispievať k intenzite, dĺžke horenia, tleniu a opätovnému rozhoreniu požiariska. Hodnotí sa podľa rozmerových tried a stupňa rozkladu.

Pri strednom a hrubom drevnom palive sa rozlišuje najmenej:

- priemer alebo priemerová trieda,
- dĺžka alebo objem,
- stupeň rozkladu,
- poloha voči povrchu,
- podiel materiálu v kontakte s pôdou,
- priestorová koncentrácia,
- pôvod materiálu.

Celková hmotnosť hrubého dreva sa nemá bez rozlíšenia pripočítavať k jemnému palivu, ktoré riadi rýchlosť povrchového šírenia. Hodnoty sa vedú oddelene a spájajú sa až podľa požiadaviek konkrétneho výpočtového alebo hodnotiaceho postupu.

Hĺbka palivového lôžka vyjadruje zvislý rozmer vrstvy, v ktorej sa nachádza palivo podieľajúce sa na povrchovom horení. Uvádza sa v metroch alebo centimetroch podľa typu vrstvy.

Hĺbka ovplyvňuje objemové usporiadanie paliva, prúdenie vzduchu a prenos tepla medzi palivovými časticami. Rovnaká plošná množstvo rozložená v tenkej a kompaktnej vrstve sa môže správať inak než rovnaká hmotnosť uložená vo vysokej a prevzdušnenej vrstve.

Hĺbka sa určuje osobitne pre:

- opad,
- hrabanku,
- bylinné palivo,
- krovínové palivo,
- súvislú vrstvu drevných zvyškov.

Pri zmiešanom palivovom komplexe sa hĺbka jednotlivých funkčne odlišných vrstiev zaznamenáva samostatne. Súhrnná hĺbka sa používa iba vtedy, ak je presne definované, ktoré zložky zahŕňa.

Objemová hustota palivového lôžka vyjadruje suchú hmotnosť paliva v jednotke zdanlivého objemu vrstvy (21):

$$\rho_b = \frac{m_s}{A \cdot d} \quad (21)$$

kde:

ρ_b – objemová hustota palivového lôžka ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

m_s – suchá hmotnosť paliva (kg)

A – hodnotená plocha (m^2)

d – priemerná hĺbka palivového lôžka (m)

Parameter vyjadruje priemernú suchú hmotnosť paliva v zdanlivom objeme hodnotenej vrstvy a poskytuje informáciu o jej priestorovom usporiadaní a kompaktnosti. Nesmie sa zamieňať s hustotou materiálu jednotlivých palivových častíc ani s objemovou hustotou korunového paliva.

Veľmi kompaktná vrstva môže obmedzovať prenikanie vzduchu a plameňa do svojej hĺbky. Veľmi riedka vrstva môže mať nedostatočný kontakt medzi jednotlivými časticami. Medzi týmito stavmi sa nachádza rozsah usporiadania podporujúci účinný prenos tepla a šírenie plameňa.

Pokryvnosť vyjadruje podiel hodnotenej plochy, ktorý je pri zvislom priemete prekrytý konkrétnym palivovým komponentom. Uvádza sa v percentách.

Samostatne sa môže určovať pokryvnosť:

- opadu,
- bylinného paliva,
- trávového paliva,
- machov a lišajníkov,
- krovín,
- ležiaceho dreva,
- plôch bez súvislého paliva.

Súčet pokryvností jednotlivých vrstiev môže presiahnuť 100 %, ak sa vrstvy vertikálne prekrývajú.

Pokryvnosť sa preto nesmie používať ako náhrada množstva paliva; oba parametre sa vedú samostatne.

Pokryvnosť neposkytuje priamu informáciu o množstve paliva. Hustá nízka vrstva môže mať rovnakú pokryvnosť ako riedke vysoké palivo, ale ich množstvo a správanie pri požiari budú rozdielne.

Horizontálna kontinuita vyjadruje mieru plošného prepojenia palivovej vrstvy. Ide o samostatný parameter, ktorý nemožno úplne nahradiť priemernou pokryvnosťou. V navrhovanej metodike sa horizontálna kontinuita opisuje najmenej kombináciou pokryvnosti, veľkosti alebo frekvencie medzier a informácie o tom, či dominantný nositeľ šírenia vytvára v hodnotenej jednotke súvislú cestu.

Dve plochy môžu mať rovnakú pokryvnosť, ale rozdielne priestorové usporiadanie. Palivo môže vytvárať jednu súvislú vrstvu alebo množstvo navzájom oddelených škvŕn. Pre šírenie požiaru je rozhodujúce, či sa medzi palivovými časťami nachádzajú medzery, ktoré čelo požiaru pri daných podmienkach nedokáže prekonať.

Horizontálnu kontinuitu možno vyjadriť:

- triedou súvislosti,
- podielom súvisle pokrytej plochy,
- priemernou veľkosťou medzier,
- hustotou prerušení,
- ukazovateľom priestorového prepojenia,
- podielom najväčšieho súvislého palivového útvaru.

Na celoštátnej úrovni je vhodné použiť jednoznačne definované triedy. Pri podrobnom hodnotení možno uplatniť priestorové ukazovatele odvodené z rastrových alebo objektovo orientovaných údajov.

Pomer povrchu palivovej častice k jej objemu vyjadruje plochu povrchu pripadajúcu na jednotku objemu (22):

$$\sigma = \frac{S}{V} \quad (22)$$

kde:

σ – pomer povrchu k objemu (m^{-1})

S – povrch palivovej častice (m^2)

V – objem palivovej častice (m^3)

Jemné častice majú vyššiu hodnotu tohto pomeru, rýchlejšie prijímajú a strácajú vlhkosť a rýchlejšie sa zahrievajú. Parameter je významný najmä pri tvorbe palivových modelov.

Pri veľkoplošnom mapovaní sa spravidla neurčuje samostatne pre každú rastrovú bunku. Môže sa priradovať podľa dominantného druhu a veľkostnej triedy paliva, pričom zdroj hodnoty musí byť uvedený v dátovom slovníku.

Stupeň rozkladu sa hodnotí najmä pri hrabanke a drevnom palive. Ovplyvňuje hustotu materiálu, schopnosť zadržiavať vodu, prúdenie vzduchu, spôsob horenia a dĺžku tlenia.

Pri ležiacom dreve sa odporúča používať viacstupňovú triedu založenú na:

- zachovaní alebo neprítomnosti kôry,
- tvrdosti dreva,
- zachovaní pôvodného tvaru prierezu,

- stupni zapadnutia do pôdy,
- prítomnosti machov a vegetácie,
- rozpade konárov a štruktúry dreva.

Triedy rozkladu musia byť definované tak, aby ich mohli rozdielni hodnotitelia určovať porovnateľným spôsobom.

Organické vrstvy nachádzajúce sa pod povrchovým opadom majú význam najmä pri tlejúcich a podpovrchových požiaroch. Ich charakteristiky sa nemajú zlúčiť s parametrami voľne uloženého povrchového paliva.

Základné hodnotené parametre zahŕňajú:

- hrúbku hrabanky a humusovej vrstvy,
- suchú hmotnosť na jednotku plochy,
- objemovú hustotu,
- vlhkosť,
- podiel organickej hmoty,
- stupeň rozkladu,
- priestorovú súvislosť organickej vrstvy.

Hrúbka organickej vrstvy sama osebe nevystihuje množstvo dostupného paliva. Rovnaká hrúbka môže mať pri rozdielnom stupni rozkladu a objemovej hustote výrazne odlišnú hmotnosť a schopnosť udržať tlenie.

Bylinné a krovinné palivo môže riadiť povrchové šírenie alebo vytvárať prechod k vyšším vegetačným vrstvám. Pri jeho hodnotení sa rozlišuje:

- priemerná a maximálna výška vrstvy,
- pokryvnosť,
- plošná palivová množstvo,
- podiel živých a odumretých častí,
- horizontálna kontinuita,
- pri krovinách aj vertikálna hustota,
- fenologická alebo sezónna fáza.

Výška a pokryvnosť nemajú byť používané ako priama náhrada pre množstvo paliva. Vysoká pokryvnosť môže byť vytvorená riedkou vegetáciou s nízkou hmotnosťou, zatiaľ čo nižšia pokryvnosť môže zahŕňať husté a kompaktné kroviny.

Podiel živej a odumretej biomasy je významný najmä pri trávach a bylinách. Počas starnutia a odumierania sa časť živej biomasy presúva do odumretej zložky, čím sa mení jej vlhkosť a dostupnosť pre horenie bez zásadnej zmeny celkovej nadzemnej hmotnosti.

Rebríkové palivo charakterizuje vertikálne prepojenie medzi povrchovou vrstvou a korunami stromov. Nemá sa vyjadrovať iba dvojhodnotovým údajom o jeho prítomnosti alebo neprítomnosti.

Základné parametre rebríkového paliva sú:

- spodná výška palivovej vrstvy nad povrchom,
- horná výška palivovej vrstvy,
- priemerná výška,
- pokryvnosť,
- priestorová hustota,
- počet vertikálnych palivových vrstiev,
- vzdialenosť medzi susednými vrstvami,
- podiel zaplnených výškových intervalov,
- podiel živého a odumretého paliva,
- spojenie s hlavnou korunovou vrstvou.

Pri základnom mapovaní možno použiť päť tried vertikálnej kontinuity:

- bez významného rebríkového paliva,
- nízka vertikálna kontinuita,
- stredná vertikálna kontinuita,
- vysoká vertikálna kontinuita,
- veľmi vysoká vertikálna kontinuita.

Každá trieda musí byť určená merateľnými intervalmi výšky, pokryvnosti a veľkosti medzier. Bez stanovenia konkrétnych hraníc by klasifikácia závisela prevažne od subjektívneho hodnotenia.

Pri podrobnom spracovaní údajov laserového skenovania možno vertikálnu kontinuitu vyjadriť pomocou výškového profilu vegetácie alebo trojrozmerného modelu vytvoreného z objemových buniek. Podiel buniek obsadených vegetáciou v jednotlivých výškových pásmach umožňuje identifikovať súvislé a prerušované palivové vrstvy (Viedma, Silva, Moreno a Hudak, 2024).

Korunové palivo sa hodnotí prostredníctvom parametrov opisujúcich polohu, množstvo, objem a priestorové usporiadanie jemných palivových častí v korunovej vrstve.

Medzi základné parametre patria:

- výška porastu,
- výška korunovej bázy,
- hĺbka korunovej vrstvy,
- korunová pokryvnosť,
- plošné množstvo korunového paliva,
- objemová hustota korunového paliva,
- horizontálna kontinuita korún,
- drevinové zloženie korunovej vrstvy,
- podiel odumretého jemného paliva v korunách.

Výška porastu vyjadruje charakteristickú výšku hornej korunovej vrstvy. Podľa účelu môže ísť o priemernú výšku, strednú výšku, hornú výšku, dominantnú výšku alebo vybraný horný percentil bodov laserového skenovania. Použitá definícia musí byť rovnaká pri terénnom zisťovaní, kalibrácii priestorového modelu a interpretácii výslednej vrstvy.

Priestorové vrstvy odvodené z laserového skenovania často používajú vysoký percentil normalizovaných výšok, pretože absolútna maximálna hodnota môže byť ovplyvnená jednotlivými chybnými bodmi. Použitá charakteristika musí byť uvedená v metadátach a nesmie sa bez vysvetlenia zamieňať so strednou výškou z opisu lesného porastu.

Výška korunovej bázy (CBH) vyjadruje zvislú vzdialenosť od terénu po spodnú hranicu súvislej korunovej palivovej vrstvy. Uvádza sa v metroch.

Pri jej určovaní treba rozlišovať:

- výšku najnižšej živej vetvy,
- výšku bázy individuálnej koruny,
- priemernú výšku bázy korún stromov,
- funkčnú výšku bázy súvislého korunového paliva.

Pre hodnotenie prechodu povrchového požiaru do korún je najvýznamnejšia funkčná výška korunovej bázy. Ojedinelá nízka vetva nemusí vytvárať dostatočnú palivovú vrstvu, zatiaľ čo husté zmladenie alebo súvislé suché spodné vetvy môžu funkčnú vzdialenosť výrazne znížiť.

Pri viacvrstvových porastoch jedna priemerná hodnota výšky korunovej bázy nemusí vystihovať miestne vertikálne prepojenia. Preto sa musí interpretovať spolu s parametrami rebríkového paliva.

Hĺbka korunovej vrstvy predstavuje odvodený geometrický parameter, ktorý vyjadruje zvislý rozdiel medzi charakteristickou výškou hornej časti porastu a výškou korunovej bázy (23):

$$H_k = H_p - V_{kb} \quad (23)$$

kde:

H_k – hĺbka korunovej vrstvy (m)

H_p – charakteristická výška porastu (m)

V_{kb} – výška korunovej bázy (m)

Pri viacvrstvových porastoch jednoduchý rozdiel nemusí zachytiť vnútorné medzery a oddelené korunové úrovne. V takom prípade je potrebné doplniť výškový profil vegetácie alebo počet a polohu jednotlivých korunových vrstiev.

Korunová pokryvnosť vyjadruje podiel plochy prekrytý zvislým priemetom korún stromov. Uvádza sa v percentách.

Musí byť presne určené, či sa prekrývajúce koruny započítavajú iba raz alebo či ide o súčet individuálnych priemetov. Pri rastrovom mapovaní sa spravidla používa podiel bunky prekrytý aspoň jednou korunou.

Korunová pokryvnosť charakterizuje horizontálnu uzavretosť porastu, ale nie je priamou náhradou objemovej hustoty korunového paliva. Porasty s rovnakou pokryvnosťou môžu mať rozdielnú hĺbku korún, drevinové zloženie a množstvo jemnej korunovej biomasy.

Plošné množstvo korunového paliva (CFL, z angl. *Canopy Fuel Load*) vyjadruje suchú hmotnosť dostupného jemného korunového paliva vzťahnutú na jednotku pôdorysnej plochy porastu. Ide spravidla

o modelovaný biometrický parameter odvodený zo stromovej inventarizácie a alometrických vzťahov, nie o priamo meranú priestorovú veličinu (24):

$$N_{kp} = \frac{m_k}{A} \quad (24)$$

kde:

N_{kp} – plošná množstvo korunového paliva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

m_k – suchá hmotnosť dostupného jemného korunového paliva (kg)

A – pôdorysná plocha porastu (m^2)

Do dostupného korunového paliva sa zahrňajú najmä listy alebo ihličie a jemné vetvičky schopné zapojiť sa počas prechodu korunového frontu do plameňového horenia. Horná hranica priemeru vetvičiek musí byť jednoznačne určená použitou metodikou.

Plošná množstvo korunového paliva sa spravidla odvodzuje z počtu stromov, drevinového zloženia, rozmerov stromov a alometrických rovníc. Ide preto prevažne o modelovaný parameter, nie o priamo meranú hodnotu každej mapovej bunky.

Objemová hustota korunového paliva (CBD) vyjadruje suchú hmotnosť dostupného jemného korunového paliva v jednotke objemu korunovej vrstvy (25):

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k} \quad (25)$$

kde:

ρ_k – objemová hustota korunového paliva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

m_k – suchá hmotnosť dostupného jemného korunového paliva (kg)

V_k – objem korunovej vrstvy (m^3)

Ak je odvodená zo stromovej inventarizácie, alometrických vzťahov alebo LiDAR metrík, musí byť v databáze označená ako modelovaný parameter. Relatívna LiDAR metrika bez prevodu na suchú hmotnosť sa nesmie uvádzať v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a má sa označiť ako relatívny index hustoty korunového paliva.

Pri jednoduchom porastovom vyjadrení možno objemovú hustotu korunového paliva približne odvodiť ako pomer plošného množstva korunového paliva a hĺbky korunovej vrstvy (26):

$$\rho_k = \frac{N_{kp}}{H_k} \quad (26)$$

Takto vypočítaná hodnota predstavuje priemernú objemovú hustotu v celom korunovom profile. Palivo však nebýva rozložené rovnomerne. Pri podrobnejšom hodnotení je preto vhodné určovať charakteristickú alebo maximálnu hustotu v pohyblivom zvislom okne, pričom veľkosť použitého okna musí byť uvedená.

Objemová hustota korunového paliva súvisí najmä s možnosťou udržania aktívneho korunového požiaru. Nesmie sa zamieňať s korunovou pokryvnosťou, zakmenením ani celkovou zásobou dreva.

Horizontálna kontinuita korún vyjadruje mieru prepojenia korunového paliva medzi susednými stromami alebo skupinami stromov. Možno ju opísať pomocou:

- korunovej pokrývnosti,

- priemernej vzdialenosti medzi korunami,
- podielu prekryvajúcich sa korún,
- veľkosti porastových medzier,
- podielu najväčšieho súvislého korunového útvaru,
- priestorových ukazovateľov prepojenia.

Pri modelovaní sa musí rozlišovať plošný priemer od miestnej kontinuity v smere predpokladaného šírenia. Aj porast s nižšou priemernou korunovou pokryvnosťou môže obsahovať súvislý pás korún podporujúci šírenie požiaru v konkrétnom smere.

Odumreté vetvičky, suché ihličie alebo listy a ďalší materiál zachytený v korunách môžu mať nižšiu vlhkosť než živá časť koruny. Ich zastúpenie môže ovplyvniť prvotné zapálenie korunovej vrstvy.

Parameter možno evidovať ako:

- percentuálny podiel odumretého jemného paliva,
- samostatnú plošnú množstvo,
- triedu nízkeho, stredného alebo vysokého zastúpenia,
- údaj o štádiu poškodenia lesného porastu.

Jeho veľkoplošné odvodenie je spojené s vysokou mierou neistoty a vyžaduje kombináciu terénnych údajov, informácií o zdravotnom stave porastu a časových snímok.

Vlhkosť paliva sa v tomto systéme nepovažuje za stabilnú vlastnosť palivového typu. Ide o dynamický stavový parameter, ktorý sa viaže na konkrétnu palivovú zložku, dátum a čas. Samostatne sa vedie najmenej vlhkosť jemného odumretého povrchového paliva a podľa účelu aj vlhkosť živého bylinného, krovinného a jemného korunového paliva.

Gravimetrická vlhkosť vztiahnutá na suchú hmotnosť sa vyjadruje vzťahom (27):

$$M = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (27)$$

kde:

M – vlhkosť paliva (%)

m_v – hmotnosť vlhkej vzorky (g)

m_s – hmotnosť suchej vzorky (g)

V geodatabáze sa osobitne vedie:

- vlhkosť jemného odumretého povrchového paliva,
- vlhkosť stredného a hrubého odumretého paliva,
- vlhkosť hrabanky alebo humusovej vrstvy,
- vlhkosť živej bylinnej vegetácie,
- vlhkosť živého krovinného paliva,
- vlhkosť jemného korunového paliva.

Každý hodnotený parameter musí mať definovaný spôsob vzniku hodnoty. V metodike sa rozlišujú priamo merané, odvodené geometrické, modelované biometrické a klasifikačne priradené hodnoty. Tento atribút je povinnou súčasťou palivovej databázy.

Každá hodnota musí obsahovať dátum a čas platnosti, spôsob určenia a údaj o tom, či ide o priame meranie alebo modelový odhad.

Jedna všeobecná hodnota vlhkosti priradená celému palivovému komplexu nie je postačujúca. Jemné odumreté palivo reaguje na atmosférické podmienky podstatne rýchlejšie než hrubé drevo, podpovrchové organické vrstvy alebo živé korunové palivo.

Niektoré charakteristiky nie sú samy osebe palivovými parametrami, ale sú potrebné na ich odvodenie, priestorové rozšírenie alebo interpretáciu. Patria sem najmä:

- drevinové zloženie,
- vek alebo vývojové štádium porastu,
- zakmenenie,
- počet stromov na jednotku plochy,
- stredná hrúbka stromov,
- stredná a dominantná výška,
- kruhová základňa,
- zásoba dreva,
- druh a čas hospodárskeho zásahu,
- čas od ťažby alebo poškodenia porastu,
- lesný typ a stanovištné charakteristiky,
- sklon a orientácia svahu,
- poloha voči okraju lesa.

Tieto premenné sa nemajú v konečnom hodnotení automaticky interpretovať ako priame ukazovatele paliva. Slúžia na stratifikáciu územia, odvodenie alometrických veličín, priestorové modelovanie, aktualizáciu a kontrolu výsledkov.

Rozsah zisťovania sa musí prispôbiť úrovni mapovania. Nie všetky parametre možno s rovnakou spoľahlivosťou určiť pre celé územie Slovenskej republiky.

Minimálny súbor parametrov povrchového paliva zahŕňa:

- dominantný nositeľ povrchového šírenia,
- základný typ povrchového paliva,
- pokryvnosť dominantnej vrstvy,
- hĺbku palivového lôžka,
- množstvo jemného odumretého paliva,
- množstvo hrubšieho ležiaceho dreva,
- horizontálnu kontinuitu,
- aktuálnu vlhkosť jemného paliva alebo jej modelový odhad.

Rozšírený súbor parametrov povrchového paliva dopĺňa:

- množstvo jednotlivých palivových komponentov,
- rozdelenie do veľkostných a časových tried,
- objemovú hustotu palivového lôžka,

- pomer povrchu k objemu,
- stupeň rozkladu,
- podiel živej a odumretej bylinnej biomasy,
- výšku a hustotu krovinovej vrstvy,
- parametre podpovrchových organických vrstiev.

Minimálny súbor parametrov korunového paliva zahŕňa:

- výšku porastu,
- výšku korunovej bázy,
- korunovú pokryvnosť,
- hĺbku korunovej vrstvy,
- plošnú množstvo alebo objemovú hustotu korunového paliva,
- základnú triedu horizontálnej kontinuity korún.

Rozšírený súbor parametrov korunového a rebríkového paliva dopĺňa:

- zvislý profil vegetácie,
- počet a polohu palivových vrstiev,
- vzdialenosti medzi vrstvami,
- objemovú hustotu vegetácie v jednotlivých výškových pásmach,
- zvislé rozdelenie objemovej hustoty korunového paliva,
- podiel odumretého jemného paliva v korunách,
- vzdialenosť medzi susednými korunami,
- podrobné ukazovatele horizontálneho prepojenia.

Minimálny súbor je určený najmä na priestorovo súvislé mapovanie. Rozšírený súbor sa uplatňuje na kalibračných lokalitách, experimentálnych plochách, v územiach s vysokou prioritou alebo pri podrobnom modelovaní správania požiaru.

Pre každý parameter sa v geodatabáze odporúča evidovať:

- kód parametra,
- slovenský názov,
- odbornú definíciu,
- jednotku,
- dátový typ,
- nameranú alebo odvodenú hodnotu,
- dátum platnosti,
- zdroj údajov,
- metódu určenia,
- pôvodné priestorové rozlíšenie alebo podpornú plochu,
- mieru neistoty,
- identifikátor validačného záznamu.

Navrhované pracovné kódy polí sú vytvorené v slovenskom jazyku (tabuľka 4). Kódy neobsahujú diakritiku, aby boli použiteľné v rozdielnych databázových a geografických informačných systémoch.

Tabuľka 4 Navrhované hodnotené parametre povrchového, rebríkového a korunového paliva

Kód poľa	Parameter	Palivová vrstva	Jednotka alebo typ	Charakter hodnoty	Primárny spôsob získania	Hlavné využitie	Poznámka
typ_povrch	typ povrchového paliva	povrchová	kategória	meraná / klasifikačne odvodená	terénny opis	terénne údaje a priestorová klasifikácia	Opisuje dominantné zloženie povrchovej vrstvy; nejde o palivový model.
nositel_sir	dominantný nositeľ šírenia	povrchová	kategória	meraná / interpretačná	terénny opis celej hodnotenej jednotky	odvodenie a overenie	Určuje zložku, ktorá pri suchých podmienkach vytvára najpravdepodobnejšiu cestu šírenia.
mnoz_jem	množstvo jemného odumretého paliva	povrchová	kg·m ⁻² alebo t·ha ⁻¹	meraná / modelovaná	plošný terénny odber	prevodná tabuľka a terénna kontrola	Uvádzať na suchú hmotnosť a vždy s presne definovanou plochou odberu.
mnoz_byl	množstvo bylinného paliva	povrchová	kg·m ⁻² alebo t·ha ⁻¹	meraná / modelovaná	plošný odber a terénny opis	terénne zisťovanie	Živú a odumretú zložku viesť oddelene.
mnoz_krov	množstvo krovínového paliva	povrchová / rebríková	kg·m ⁻² alebo t·ha ⁻¹	meraná / modelovaná	výberový odber, alometria, terénny opis	terénne meranie	Funkčné zaradenie závisí od výšky, hustoty a kontaktu s ďalšími vrstvami.
mnoz_drevo	množstvo ležiaceho dreva podľa veľkostných tried	povrchová	kg·m ⁻² , t·ha ⁻¹ alebo m ³ ·ha ⁻¹	meraná / odvodená	líniové transekty a terénne meranie	terénne meranie	Veľkostné triedy a stupeň rozkladu evidovať samostatne.
hlb_opad	hlbka opadu	povrchová	cm	meraná	bodové merania v odberovom rámci	terénne odbery alebo miestny model	Priemerovať až po zachovaní jednotlivých meraní.

Kód poľa	Parameter	Palivová vrstva	Jednotka alebo typ	Charakter hodnoty	Primárny spôsob získania	Hlavné využitie	Poznámka
hlb_hrab	hĺbka hrabanky	povrchová	cm	meraná	bodové merania v odberovom rámci	terénne meranie	Hranicu opad/hrabanka definovať jednotným pravidlom.
hlb_lozko	hĺbka palivového lôžka	povrchová	m alebo cm	meraná	terénne meranie	terénne meranie a model	Pri zmiešanom komplexe uvádzať hĺbku funkčne odlišných vrstiev samostatne.
obj_hust_pov	objemová hustota povrchového palivového lôžka	povrchová	kg·m ⁻³	odvodená	výpočet zo suchej hmotnosti, plochy a hĺbky	transektové alebo objemové meranie	Nezamieňať s hustotou materiálu ani s objemovou hustotou korunového paliva.
pokryv_pov	pokryvnosť povrchových zložiek	povrchová	%	meraná / odvodená	terénny odhad, obrazová analýza	terénne meranie	Pokryvnosť nie je náhradou množstva paliva; pri prekrývajúcich sa vrstvách môže súčet presiahnuť 100 %.
spojit_pov	horizontálna kontinuita povrchového paliva	povrchová	trieda / index	meraná / odvodená	pokryvnosť, medzery, terénne alebo GIS hodnotenie	výpočet	Hodnotiť spolu s dominantným nositeľom šírenia a veľkosťou medzier.
rozsah_rebr	výškový rozsah rebríkového paliva	rebríková	m	meraná / odvodená	vertikálny terénny profil, LiDAR	terénne hodnotenie alebo snímky	Opisuje priestor medzi najnižšou a najvyššou funkčne významnou vrstvou rebríkového paliva.
pocet_vrst	počet obsadených výškových pásiem	rebríková	počet	meraná / odvodená	vertikálny profil	priestorová analýza a terénne overenie	Primárny profilový údaj; trieda rebríkového paliva sa

Kód poľa	Parameter	Palivová vrstva	Jednotka alebo typ	Charakter hodnoty	Primárny spôsob získania	Hlavné využitie	Poznámka
medzera_vrst	najväčšia vertikálna medzera	rebríková	m	meraná / odvodená	vertikálny profil, LiDAR	terénne hodnotenie	odvodzuje až následne. Vyjadruje najväčšie prerušenie medzi funkčne významnými palivovými vrstvami.
spojit_zvis	funkčné spojenie s hlavnou korunovou vrstvou	rebríková	áno/nie alebo trieda	interpretačná / klasifikačne odvodená	terénny profil a priestorová interpretácia	meranie alebo dynamický model	Nevychádza iba z najnižšej vetvy, ale z celého vertikálneho profilu.
tried_rebr	trieda rebríkového paliva	rebríková	1–5	klasifikačne odvodená	odvodenie z profilových parametrov	mapovanie a porovnanie vertikálnej kontinuity	Klasifikačné hranice musia byť verziované a kalibrovateľné.
vyska_por	výška porastu	korunová	m	meraná / odvodená	terénne meranie alebo LiDAR	korunová štruktúra a modelovanie	Použitá definícia výšky musí byť rovnaká pri meraní, kalibrácii a mapovaní.
vyska_kor_b	výška korunovej bázy	korunová	m	meraná / interpretovaná / odvodená	terénne funkčné určenie, LiDAR po kalibrácii	iniciácia horenia korún	Uprednostniť funkčnú bázu súvislej korunovej vrstvy pred najnižšou izolovanou vetvou.
hlb_kor	hĺbka korunovej vrstvy	korunová	m	odvodená	rozdiel výšky porastu a funkčnej výšky korunovej bázy	geometria korunovej vrstvy	Ide o odvodený geometrický parameter.
pokryv_kor	korunová pokryvnosť	korunová	%	meraná / odvodená	terén, ortofoto, LiDAR	horizontálna štruktúra korún	Nesmie sa používať ako priama náhrada množstva ani objemovej hustoty korunového paliva.

Kód poľa	Parameter	Palivová vrstva	Jednotka alebo typ	Charakter hodnoty	Primárny spôsob získania	Hlavné využitie	Poznámka
mnoz_kor	plošné množstvo korunového paliva	korunová	kg·m ⁻²	modelovaná	potenciál korunového horenia	korunová	Vzťahuje sa na dostupné jemné korunové palivo; spravidla nejde o priamu terénnu veličinu.
obj_hust_kor	objemová hustota korunového paliva	korunová	kg·m ⁻³	modelovaná	udržanie aktívneho korunového požiaru	korunová	Relatívna LiDAR metrika bez prevodu na suchú hmotnosť sa nesmie uvádzať v kg·m ⁻³ .
spojit_kor	horizontálna kontinuita korún	korunová	trieda / index	odvodená	šírenie medzi korunami	korunová	Rozlišovať plošnú pokrývnosť a funkčné priestorové prepojenie korunových častí.
odum_kor	podiel odumretého jemného paliva v korunách	korunová	%	meraná / modelovaná	zapáliteľnosť a intenzita korunového horenia	korunová	Uviesť spôsob vymedzenia jemnej odumretej korunovej frakcie.
vlhk_jem	vlhkosť jemného odumretého povrchového paliva	dynamický stav	%	meraná / modelovaná	aktuálne nebezpečenstvo vzniku požiaru	dynamický stav	Vždy viazať na konkrétny čas, miesto a palivovú zložku.
vlhk_zive	vlhkosť živého bylinného a krovínového paliva	dynamický stav	%	meraná / modelovaná	sezónna dostupnosť živého paliva pre horenie	dynamický stav	Fenologický stav a rastlinnú zložku evidovať spolu s vlhkosťou.
vlhk_kor	vlhkosť jemného korunového paliva	dynamický stav	%	meraná / modelovaná	prechod do korún	dynamický stav	Samostatný dynamický parameter; neukladať ako nemennú vlastnosť palivového typu.

Uvedené názvy polí predstavujú návrh pracovného kódovania. Pri konečnej tvorbe geodatabázy sa musia zosúladiť s technickými obmedzeniami použitého formátu. Skrátene názvu poľa nesmie viesť k strate jeho jednoznačného významu. Úplná definícia každého poľa musí zostať zachovaná v dátovom slovníku.

Pri interpretácii treba zabrániť tomu, aby sa jeden ľahko dostupný údaj používal ako náhrada viacerých odlišných vlastností.

Napríklad, drevinové zloženie nenahrádza množstvo paliva. Korunová pokrývnosť nenahrádza objemovú hustotu korunového paliva. Výška najnižšej vetvy nenahrádza funkčnú výšku korunovej bázy. Hrúbka opadu nenahrádza jeho suchú hmotnosť. Celková biomasa nenahrádza množstvo dostupného jemného paliva. Vegetačný index nenahrádza priamo meranú vlhkosť povrchového paliva.

Medzi parametrami môžu existovať štatistické vzťahy, ich použitie však musí byť podložené verifikovanou kalibráciou. Ak sa napríklad palivová množstvo odvodzuje z hĺbky vrstvy, musí byť pre príslušný palivový typ známa objemová hustota a neistota použitého vzťahu.

Hodnota parametra spravidla závisí od veľkosti plochy, na ktorej sa zisťuje. Množstvo paliva namerané v rámci malej odberovej plochy môže presne zachytiť miestnu vrstvu opadu, nemusí však reprezentovať celý porast. Korunovú pokrývnosť možno vypočítať pre desaťmetrovú bunku, porastový polygón alebo väčšiu krajinnú jednotku a v každom prípade môže nadobudnúť odlišnú hodnotu.

Pri každom parametri sa preto musí uvádzať jeho podporná plocha. Pri agregácii nemožno automaticky používať rovnaký štatistický ukazovateľ pre všetky veličiny. Priemerné množstvo paliva sa môže vyjadriť plošne váženým priemerom, celkové množstvo paliva súčtom a miestna vysoká koncentrácia maximom alebo horným kvantilom. Pri kategorizovaných údajoch sa uvádza dominantná trieda aj podiel jednotlivých tried.

Pracovný raster s bunkou 10 × 10 m môže slúžiť ako technický priestorový rámec, ale nevytvára desaťmetrovú informačnú podrobnosť pri parametroch odvodených z hrubších zdrojov. Pri každom poli sa preto musí uchovávať aj pôvodné rozlíšenie a spôsob priestorového odvodenia.

Nie všetky parametre musia byť samostatne mapované pre celé územie. Niektoré sú potrebné ako priestorovo súvislé vrstvy, iné možno odvodiť alebo priradiť až pri zostavovaní palivového modelu.

Samostatne mapované majú byť predovšetkým:

- dominantný typ povrchového paliva,
- množstvo hlavných povrchových palivových zložiek,
- hĺbka a pokrývnosť povrchovej vrstvy,
- horizontálna kontinuita povrchového paliva,
- prítomnosť a trieda rebríkového paliva,
- výška korunovej bázy,
- korunová pokrývnosť,
- plošné množstvo a objemová hustota korunového paliva,
- horizontálna kontinuita korún,
- aktuálna vlhkosť paliva.

Parametre, ako pomer povrchu k objemu, obsah minerálnych látok alebo efektívna výhrevnosť, možno podľa dostupnosti viesť ako charakteristiky palivového typu alebo palivového modelu. Ich priestorová premenlivosť sa nemusí mapovať samostatne, pokiaľ na to nie sú k dispozícii dostatočné experimentálne alebo terénne údaje.

Výber hodnotených parametrov musí zostať otvorený ďalšiemu spresňovaniu. Po získaní nových terénnych meraní, údajov laserového skenovania alebo výsledkov laboratórneho hodnotenia možno súbor rozšíriť. Jeho základná štruktúra však musí zostať stabilná, aby bolo možné porovnávať údaje medzi regiónmi a sledovať ich zmeny v čase.

Výsledný súbor parametrov vytvára obsahové prepojenie medzi terénnym zisťovaním, klasifikáciou paliva, tvorbou geodatabázy a modelovaním správania požiaru. Jeho úlohou nie je zhromaždiť čo najväčší počet premenných, ale vybrať charakteristiky s jednoznačným odborným významom, ktoré možno spoľahlivo určiť a ktorých priestorová interpretácia zodpovedá skutočnej kvalite vstupných údajov.

2.7. Prepojenie terénneho zisťovania a geopriestorového spracovania údajov

Terénne zisťovanie a geopriestorové spracovanie údajov predstavujú dve vzájomne previazané časti mapovania lesného paliva. Terénne merania poskytujú priamu informáciu o zložení, množstve, vlhkosti a priestorovej štruktúre paliva na konkrétnych plochách, ich rozsah je však nevyhnutne obmedzený. Geopriestorové údaje umožňujú zachytiť rozsiahle územie súvisle, mnohé palivové vlastnosti však vyjadrujú iba nepriamo. Spoľahlivá palivová mapa preto vzniká až vtedy, keď sú oba typy údajov navrhnuté, lokalizované, časovo zosúladené a vyhodnotené ako jeden metodický systém (Keane, 2015).

Prepojenie nespočíva v mechanickom priradení priemernej terénnej hodnoty ku všetkým plochám rovnakého typu lesa. Takýto postup by nerešpektoval vnútornú premenlivosť porastov ani rozdielnu schopnosť jednotlivých priestorových údajov zachytiť povrchové, rebríkové a korunové palivo. Úlohou terénnych plôch je vytvoriť referenčný základ, pomocou ktorého možno vysvetliť vzťahy medzi skutočne zistenými palivovými parametrami a premennými odvodenými z lesníckych databáz, optických a radarových snímok, ortofotomáp, digitálnych modelov reliéfu alebo laserového skenovania. Terénne meranie sa preto v navrhovanom systéme nepoužíva ako hodnota automaticky prenášaná na celé územie, ale ako referenčný údaj na odvodenie, kalibráciu a overenie priestorového vzťahu.

Pri každom terénnom meraní musí zostať zachovaná informácia o tom, čo bolo merané, akou metódou, na akej ploche, v akom čase a s akou polohovou presnosťou. Pri každom geopriestorovom vstupe musí byť známy jeho pôvod, dátum snímania alebo platnosti, pôvodné priestorové rozlíšenie, spôsob spracovania a odborný význam. Až následne možno posúdiť, či sú údaje navzájom porovnateľné a či je ich spoločné použitie metodicky odôvodnené.

Základným problémom pri prepájaní terénnych a geopriestorových údajov je rozdielna plocha, ku ktorej sa jednotlivé hodnoty vzťahujú. Množstvo opadu môže byť zistené na malej odberovej ploche, množstvo ležiaceho dreva pozdĺž transektu, korunová pokrývnosť na kruhovej skusnej ploche a porastová charakteristika môže predstavovať priemer pre celú JPRL. Hodnota získaná pomocou DPZ sa pritom vzťahuje na obrazový prvok a parameter z laserového skenovania na vopred určené priestorové okno.

Podporná plocha merania preto musí byť evidovaná ako samostatná vlastnosť údajov. Určuje priestor, ktorý daná hodnota skutočne reprezentuje. Pri prepájaní sa nemá vychádzať iba zo súradnice stredu

terénnej plochy, ale podľa možností z celej jej geometrie. Ak terénna plocha presahuje niekoľko rastrových buniek, porovnávacia geopriestorová hodnota sa má odvodiť zo všetkých buniek, ktoré ju primerane reprezentujú.

V navrhovanej metodike sa pri terénnom zisťovaní rozlišuje plocha samotného čiastkového merania a plocha, pre ktorú sa výsledok následne interpretuje. Odberový rámec alebo plocha, transekt, vertikálny profil, referenčná plocha 20 × 20 m a pracovná rastrová bunka 10 × 10 m preto predstavujú rozdielne priestorové podpory a v geodatabáze sa nesmú zamieňať.

Pracovná mriežka 10 × 10 m môže slúžiť ako spoločný technický rámec spracovania, nesmie sa však zamieňať so skutočnou informačnou podrobnosťou. Ak sa výsledná hodnota skladá z viacerých čiastkových meraní, ktoré reprezentujú rozdielne plochy, možno pri spojitých aditívne interpretovateľných parametroch použiť plošne vážený priemer. V geodatabáze sa preto musí zachovať pôvodná podporná plocha a pôvodné rozlíšenie vstupu.

Ak terénna plocha pozostáva z viacerých čiastkových odberov s rozdielnou reprezentovanou plochou, plošný priemer hodnoteného parametra možno vyjadriť váženým priemerom (28):

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i a_i}{\sum a_i} \quad (28)$$

kde

$\bar{x}$ – plošne vážená hodnota parametra

x_i – hodnota i-teho čiastkového merania

a_i – plocha, ktorú dané meranie reprezentuje

Rovnaký princíp sa uplatňuje iba pri veličinách, pri ktorých má plošné priemerovanie vecný význam. Pri súčtových veličinách, kategóriách alebo maximálnych lokálnych koncentráciách sa musí použiť iný spôsob agregácie.

Presnosť lokalizácie terénnych meraní priamo ovplyvňuje kvalitu väzby na laserové údaje DPZ. Chyba niekoľkých metrov môže byť nevýznamná v homogénnom poraste, ale na okraji lesa, pri porastovej medzere, pozdĺž cesty alebo na rozhraní dvoch palivových typov môže viesť k priradeniu úplne odlišnej priestorovej charakteristiky.

Každá plocha musí mať jednoznačný identifikátor, súradnice, údaj o použitom súradnicovom referenčnom systéme, spôsob lokalizácie, odhad polohovej presnosti, tvar a rozmery plochy, dátum merania a orientáciu plochy, ak je geometria alebo rozmiestnenie vnorených jednotiek smerovo viazané. Pri transektoch sa zaznamenáva poloha ich začiatku a konca, prípadne celý priebeh. Pri plochách nepravidelného tvaru je vhodné uchovávať hranicu ako vektorový objekt, nie iba jednu stredovú súradnicu.

V zapojených lesných porastoch môže byť presnosť bežných satelitných navigačných prijímačov znížená tienением korunami a viacnásobným odrazom signálu. Ak požadovaná úloha vyžaduje presné spojenie s jemnými lidarovými alebo bezpilotnými údajmi, treba použiť presnejšie geodetické určenie polohy, korekcie polohy v reálnom čase alebo dodatočnú polohovú kontrolu voči jednoznačne identifikovateľným objektom.

Fotodokumentácia je vhodným doplnkom polohového záznamu. Mala by zachytiť stred plochy, charakter povrchového paliva, zvislú štruktúru vegetácie a základné smery pohľadu. Fotografia nemá nahrádzať meranie, pomáha však pri neskoršej kontrole neobvyklých hodnôt a pri interpretácii rozdielov medzi terénnym a diaľkovo snímaným obrazom.

Priestorová zhoda sama osebe nestačí. Palivový komplex sa mení vplyvom rastu vegetácie, opadu, rozkladu, hospodárskych zásahov, poškodenia lesného porastu a sezónnej dynamiky. Terénne meranie z jedného roku preto nemusí byť vhodným referenčným údajom pre družicovú alebo lidarovú vrstvu získanú po významnej zmene porastu.

Najvyššia časová zhoda sa vyžaduje pri parametroch s rýchlou dynamikou. Vlhkosť jemného odumretého paliva, podiel živej a odumretej bylinnej biomasy a fenologický stav vegetácie sa musia spájať s meteorologickými údajmi DPZ z rovnakého alebo veľmi blízkeho obdobia. Pri stabilnejších charakteristikách, ako je výška porastu alebo základná drevinová štruktúra, možno tolerovať väčší časový odstup, ak medzi meraniami nenastala významná zmena.

Pri každom párovaní terénneho a DPZ údaje sa musí evidovať časový rozdiel medzi oboma záznamami.

Pri každej terénnej ploche je preto potrebné kontrolovať udalosti, ktoré mohli zmeniť jej stav medzi dátumom terénneho zisťovania a dátumom priestorového vstupu. Patria sem ťažba, vetrové alebo snehové poškodenie, poškodenie podkôrnym hmyzom, požiar, odstraňovanie podrastu, výstavba komunikácie alebo výrazná obnova vegetácie.

Ak časový nesúlad nemožno odstrániť, plocha sa nemá bez upozornenia používať na kalibráciu. Môže zostať v databáze ako historický záznam, prípadne sa použije iba na hodnotenie parametrov, pri ktorých je preukázané, že sa v sledovanom období podstatne nezmenili.

Terénne plochy musia reprezentovať rozsah palivových podmienok, ktoré sa majú mapovať. Náhodný výber alebo výber prevažne založený na dostupnosti môže viesť k nadmernému zastúpeniu bežných a dobre prístupných porastov a k nedostatočnému zastúpeniu mladín, porastov s hustým podrastom, poškodených plôch, rúbanísk alebo porastov s vysokým množstvom ležiaceho dreva.

V podmienkach Slovenska sa stratifikácia navrhuje ako kombinácia HSLT/SLT, drevinového zloženia, vývojového štádia porastu, zakmenenia, porastovej štruktúry, reliéfu, poškodenia porastu a predbežných geopriestorových ukazovateľov.

Vhodná je stratifikácia podľa kombinácie porastových, stanovištných a priestorovo pozorovateľných vlastností. Pri jej návrhu možno využiť drevinové zloženie, vek alebo vývojové štádium porastu, zakmenenie, nadmorskú výšku, lesnícko-typologické zaradenie, charakter reliéfu, korunovú pokrývnosť, výškové charakteristiky a známky poškodenia. Takto sa zabezpečí, že kalibračný súbor pokryje nielen priemerné, ale aj hraničné a menej časté palivové situácie.

Stratifikácia má vychádzať z účelu mapovania. Pri povrchovom palive treba zabezpečiť dostatočné zastúpenie rozdielnych typov opadu, bylinných a krovínových vrstiev a stupňov množstva ležiaceho dreva. Pri korunovom a rebríkovom palive sa musí zachytiť rozsah výšky korunovej bázy, hustoty podrastu, vertikálnej členitosti a korunovej pokrývnosti.

Výber terénnych plôch sa nemá meniť dodatočne iba podľa toho, ktoré plochy poskytujú lepšiu zhodu s priestorovým modelom. Vylúčenie plochy musí byť odborne zdôvodnené, napríklad chybou lokalizácie, nesprávnym meraním, zásadným časovým nesúlalom alebo preukázanou zmenou porastu.

Terénny súbor sa musí rozdeliť podľa funkcie. Jedna časť slúži na vytvorenie alebo nastavenie vzťahu medzi palivovým parametrom a geopriestorovými premennými, druhá na nezávislé overenie výsledku. Použitie rovnakých údajov na vytvorenie aj hodnotenie modelu vedie k nadhodnoteniu jeho presnosti (Roberts et al., 2017).

Rozdelenie nemá byť vykonané iba náhodným výberom jednotlivých blízko seba ležiacich plôch. Pri priestorových údajoch môže existovať výrazná priestorová podobnosť susedných lokalít. Ak sa časť jedného homogénneho porastu použije na kalibráciu a susedná časť na overenie, výsledná úspešnosť môže byť neprimerane vysoká. Vhodnejšie je oddeliť celé lokality, porastové skupiny alebo priestorové bloky (Roberts et al., 2017).

Pri menšom počte terénnych meraní možno pri hodnotení prenositeľnosti modelu použiť opakované priestorovo blokované krížové overovanie, pri ktorom sú celé lokality alebo priestorové bloky postupne vynechávané z kalibračného súboru a použité na overenie. Takýto postup znižuje riziko nadhodnotenia presnosti spôsobeného priestorovou podobnosťou susedných plôch (Roberts et al., 2017).

Overovací súbor musí zahŕňať rovnaký rozsah palivových podmienok ako územie, na ktoré sa má výsledok aplikovať. Ak napríklad chýbajú nezávislé plochy v mladinách alebo poškodených porastoch, nemožno presnosť mapy v týchto kategóriách považovať za overenú.

Terénne údaje sa pred priestorovým modelovaním musia transformovať do jednoznačných premenných s definovanou jednotkou a významom. Základom je zachovať samostatné hodnoty povrchového, rebríkového a korunového paliva podľa členenia uvedeného v podkapitole 2.6.

Pri spojitých veličinách, napríklad množstve paliva, hĺbke palivového lôžka, výške korunovej bázy alebo objemovej hustote korunového paliva, sa priestorové modelovanie zameriava na odhad číselnej hodnoty. Pri palivových typoch a triedach kontinuity ide o klasifikačnú úlohu. Rozdiel medzi týmito dvoma typmi výstupov musí zostať zachovaný aj pri hodnotení presnosti.

Terénne hodnoty sa nesmú umelo zaokrúhľovať alebo predčasne prevádzať do tried, ak má byť neskôr vytvorená kvantitatívna vrstva. Pôvodná nameraná hodnota sa uchová a klasifikácia sa vytvára ako odvodený atribút. Takto možno v budúcnosti zmeniť hranice tried bez straty pôvodnej informácie.

Pri parametroch s výrazne nesymetrickým rozdelením, napríklad pri množstve hrubého ležiaceho dreva, môže byť pred modelovaním potrebná štatistická transformácia. Pôvodná jednotka a netransformovaná hodnota sa však musia uchovať v databáze a výsledok sa pred interpretáciou spätne prevedie do odborne zrozumiteľnej jednotky.

Ku každej terénnej ploche sa priradujú geopriestorové premenné, ktoré môžu vysvetľovať rozdiely v palivových parametroch. Výber musí vychádzať z odborného vzťahu k hodnotenej vlastnosti, nie iba z veľkého počtu dostupných vrstiev.

Pri povrchovom palive môžu mať význam drevinové a porastové charakteristiky, korunová pokrývnosť, oslnenie, topografická poloha, spektrálne charakteristiky vegetácie a informácie o ťažbe alebo poškodení porastu. Pri korunovom palive sú významné najmä výškové a štruktúrne charakteristiky odvodené

z laserového skenovania (Andersen, McGaughey a Reutebuch 2005), zatiaľ čo pri rebríkovom palive sú dôležité vertikálne profily a medzery medzi vegetačnými vrstvami (Viedma et al., 2024).

Z jednej priestorovej vrstvy možno odvodiť viacero charakteristík, napríklad priemer, medián, percentily, rozptyl alebo podiel určitého výškového intervalu. Ich množstvo však musí byť kontrolované. Veľký počet navzájom silne súvisiacich premenných môže viesť k nestabilnému modelu a k zdanlivo vysokej úspešnosti bez primeranej prenositeľnosti.

Pri výbere vysvetľujúcich premenných sa zároveň kontroluje časová zhoda s terénnym meraním a ich pôvodná informačná podrobnosť. Premenná získaná prevzorkovaním hrubého produktu na jemnejšiu mriežku sa nesmie interpretovať ako lokálny údaj s novým jemnejším rozlíšením.

Pri kvantitatívnom mapovaní možno všeobecný vzťah medzi hodnoteným palivovým parametrom a súborom priestorových premenných vyjadriť v tvare (29):

$$\hat{y}(s) = f(X_1(s), \dots, X_p(s)) \quad (29)$$

kde

$\hat{y}(s)$ – odhad hodnoteného palivového parametra v polohe s

f – zvolený modelový vzťah

$X_1(s), \dots, X_p(s)$ – priestorové vysvetľujúce premenné dostupné v danej polohe

Rovnica predstavuje všeobecný rámec, nie konkrétny predikčný model; forma funkcie sa určuje osobitne pre každý hodnotený parameter.

Konkrétna forma funkcie môže byť lineárna, nelineárna alebo založená na metódach strojového učenia. Výber metódy musí vychádzať z charakteru údajov, počtu terénnych meraní, interpretovateľnosti a výsledkov nezávislého overenia.

Model sa nemá vyberať iba podľa najnižšej chyby na kalibračných údajoch. Uprednostniť treba riešenie, ktoré je odborne interpretovateľné, stabilné pri priestorovom overení a nevytvára neodôvodnené hodnoty mimo rozsahu terénnych pozorovaní. Pri mapovaní pre praktické využitie je transparentnosť modelu často rovnako významná ako malé zlepšenie štatistickej presnosti. Pri výbere sa posudzuje aj schopnosť modelu prenášať sa mimo konkrétnych lokalít použitých pri kalibrácii.

Pri klasifikačných úlohách sa rovnaký princíp používa na odhad príslušnosti k palivovému typu alebo triede. Výsledok má podľa možnosti obsahovať nielen najpravdepodobnejšiu triedu, ale aj mieru istoty alebo pravdepodobnosť priradenia. Hraničné bunky s podobnou pravdepodobnosťou dvoch tried majú vyššiu neistotu než jednoznačne klasifikované plochy.

Po vytvorení a nezávislom overení vzťahu možno model aplikovať na celé územie, pre ktoré sú dostupné rovnaké alebo metodicky porovnateľné geopriestorové vstupy. Tento krok predstavuje priestorové rozšírenie terénnych poznatkov, nie priame meranie každého miesta.

Model sa má prednostne aplikovať v rozsahu podmienok reprezentovaných kalibračnými údajmi. Ak sa použije mimo tohto rozsahu, výsledok predstavuje extrapoláciu a musí byť označený zvýšenou neistotou alebo nižšou dátovou podporou.

Osobitne treba kontrolovať prenos modelu medzi regiónmi. Vzťah vytvorený v jednej prírodnej alebo lesnej oblasti nemusí byť bez ďalšieho overenia vhodný pre odlišné stanovišťa, drevinové zloženie a spôsob hospodárenia. Pri celoštátnom spracovaní môže byť preto vhodnejšie použiť súbor regionálnych alebo stratifikovaných modelov namiesto jedného univerzálneho vzťahu.

Pri trojrozmernom mapovaní nemožno geometriu vegetácie získanú laserovým skenovaním automaticky interpretovať ako suchú hmotnosť paliva. Na odvodenie množstva paliva sú potrebné terénne alebo alometrické vzťahy; moderné 3D palivové systémy preto kombinujú geometrické, inventarizačné a modelové vstupy (Marcozzi et al., 2025).

Priestorové modelovanie sa má vykonávať oddelene pre jednotlivé palivové vrstvy a až následne ich prepájať prostredníctvom spoločného priestorového identifikátora. Povrchové palivo, rebríkové palivo a korunové palivo majú rozdielne zdroje údajov, inú mierku pozorovania a rozdielnu mieru neistoty.

Spoločným objektom prepojenia nie je jedna súhrnná palivová hodnota, ale palivový profil priestorovej jednotky.

Pri povrchovom palive zostávajú rozhodujúcim referenčným zdrojom terénne merania. DPZ môže pomáhať najmä pri stratifikácii, rozpoznaní otvorených plôch, poškodení a sezónnej vegetácie, ale v zapojených porastoch je priame pozorovanie opadu a hrabanky obmedzené.

Rebríkové palivo vyžaduje kombináciu terénneho záznamu zvislej štruktúry a údajov laserového skenovania. Pri viacvrstvových porastoch je vhodnejšie pracovať s profilom vegetácie a medzerami medzi vrstvami než iba s jednou priemernou výškou korunovej bázy (Viedma et al., 2024).

Korunové palivo možno vo väčšej miere odvodiť z leteckého laserového skenovania a porastových údajov. Výška porastu a korunová pokrývnosť môžu byť odvodené priamo zo štruktúrnych údajov, zatiaľ čo plošné množstvo a objemová hustota korunového paliva vyžadujú prepojenie so suchou jemnou biomasou a alometrickými vzťahmi (Andersen, McGaughey a Reutebuch 2005).

Výsledné vrstvy sa nemajú zlúčiť do jednej všeobecnej hodnoty paliva. Ich vzájomná väzba je potrebná až pri konkrétnych analytických úlohách, napríklad pri hodnotení prechodu povrchového požiaru do korún alebo pri modelovaní správania požiaru.

Každá priestorová predikcia musí byť doplnená informáciou o tom, do akej miery sa podmienky danej bunky podobajú podmienkam zastúpeným v terénnom súbore. Samotná existencia modelovej hodnoty neznamena, že bola lokalita dostatočne reprezentovaná terénymi meraniami.

Za oblasti s vyššou neistotou sa majú označiť najmä plochy s kombináciou vstupných premenných mimo kalibračného rozsahu, oblasti s chýbajúcimi alebo staršími vstupmi, porasty po nedávnej zmene a územia, v ktorých je výsledok založený prevažne na klasifikačnom pravidle namiesto lokálne overeného vzťahu.

Súčasťou výsledku má byť samostatná vrstva dátovej podpory alebo dôveryhodnosti modelu. Tá môže vyjadrovať vzdialenosť k najbližšej referenčnej ploche, hustotu terénnych meraní, príslušnosť k zastúpenému kalibračnému rozsahu a kvalitu použitých priestorových vstupov. Takáto vrstva umožňuje používateľovi rozlíšiť mapovo zobrazenú hodnotu od miery, s akou jej možno dôverovať.

Pri prepojení terénnych a geopriestorových údajov (tabuľka 5) je nevyhnutná sledovateľnosť ich pôvodu. Výsledná hodnota musí byť spätne priraditeľná k zdrojovým vrstvám, verzii modelu a terénnym údajom použitým na jeho vytvorenie.

Pri každej výslednej vrstve sa preto eviduje najmenej dátum platnosti, použitý model alebo pravidlo, verzia vstupných vrstiev, pôvodné priestorové rozlíšenie, spôsob agregácie, identifikátor kalibračného súboru, identifikátor overovacieho súboru a ukazovateľ neistoty.

Pri každej výslednej hodnote sa eviduje jej základný pôvod: priamo meraná, odvodená, modelovaná alebo klasifikačne priradená. Podrobnejší atribút následne uvádza konkrétnu metódu vzniku hodnoty. Toto členenie je podstatné pri následnej aktualizácii a pri interpretácii mapy v odbornej praxi.

Tabuľka 5 Odporúčaný postup prepojenia údajov

Fáza	Terénna časť	Geopriestorová časť	Výstup
1. Návrh	výber parametrov a typov plôch	výber priestorových vstupov a pracovnej mierky	spoločný dátový plán
2. Lokalizácia	určenie geometrie plôch a polohovej presnosti	zarovnanie referenčných vrstiev	priestorovo jednoznačné plochy
3. Zber	meranie palivových parametrov a fotografická dokumentácia	získanie časovo zodpovedajúcich snímok a databáz	súbor terénnych a priestorových vstupov
4. Príprava	kontrola kvality, harmonizácia jednotiek, evidencia podpornej plochy a časového súladu	odvodenie vysvetľujúcich premenných	kalibračná matica
5. Modelovanie	hodnotený palivový parameter	výber odborne relevantných premenných	klasifikačný alebo kvantitatívny model
6. Overenie	nezávislé referenčné plochy	predikcia bez použitia overovacích údajov	odhad presnosti a neistoty
7. Rozšírenie	rozsah podmienok pokrytý terénnymi údajmi	aplikácia overeného modelu	priestorovo súvislá vrstva
8. Dokumentácia	identifikátory a dátumy meraní, pôvod hodnoty, verziu modelu a mieru dátovej podpory	verzie vstupov a modelov	metadáta a sledovateľnosť pôvodu

Základnou zásadou je, že geopriestorové spracovanie nemá nahradiť terénne zisťovanie, ale rozšíriť jeho informačnú hodnotu do priestoru. Terénne údaje sú potrebné na odbornú interpretáciu, kalibráciu a nezávislé overenie odvodených vrstiev. Geopriestorové údaje naopak umožňujú identifikovať priestorové vzory, ktoré samotný súbor terénnych plôch nedokáže zachytiť.

Výsledkom prepojenia musí byť priestorovo súvislý, ale zároveň transparentný súbor údajov, pri ktorom je možné rozlíšiť priamo zistenú hodnotu od modelového odhadu, poznať pôvodnú mierku vstupov a identifikovať oblasti s vyššou neistotou. Takýto prístup vytvára metodické prepojenie medzi terénnym zisťovaním paliva a následným spracovaním údajov v geografických informačných systémoch.

2.8. Spracovanie údajov v prostredí geografických informačných systémov

Spracovanie údajov v prostredí geografických informačných systémov predstavuje transformačnú fázu, v ktorej sa pôvodné terénne, lesnícke, topografické, environmentálne a diaľkovo snímané údaje menia na vzájomne kompatibilný analytický súbor. Cieľom nie je iba technicky a priestorovo zlúčiť rozdielne vrstvy, ale zachovať ich odborný význam, pôvodnú informačnú podrobnosť, časovú platnosť a mieru neistoty. Každá operácia vykonaná pri spracovaní musí byť preto reprodukovateľná a spätne dohľadateľná.

Pracovný postup nadväzuje na zásady uvedené v podkapitolách 2.3 až 2.7. Najskôr sa uchovávajú pôvodné údaje bez obsahovej zmeny, následne sa kontroluje ich geometria, atribúty, súradnicový systém a časová platnosť. Až potom sa vytvárajú harmonizované pracovné vrstvy a analytické jednotky, nad ktorými možno vykonať klasifikáciu paliva, kvantifikáciu vybraných parametrov a prípravu vstupov pre modelovanie správania požiaru.

Podstatnou zásadou je oddelenie pôvodných, predspracovaných a odvodených údajov. Pôvodný súbor sa po zaradení do databázy nemení. Každá úprava vytvára novú pracovnú vrstvu s vlastným identifikátorom, dátumom spracovania a záznamom použitej operácie. Takýto prístup umožňuje zopakovať celý postup po aktualizácii vstupov a zároveň zabráňuje strate informácie o pôvode výslednej hodnoty.

Geodatabázu sa odporúča členiť podľa funkcie údajov, nie iba podľa ich formátu. Oddelené majú byť pôvodné zdrojové údaje, harmonizované pracovné vrstvy, terénne a overovacie údaje, odvodené parametre, klasifikačné pravidlá, výsledky modelovania, mapové výstupy a metadáta.

Takéto členenie znižuje riziko zámeny meraných a modelovaných údajov. Terénne zistené množstvo paliva nesmie byť uložené v rovnakej významovej kategórii ako množstvo paliva odhadnuté priestorovým modelom bez atribútu, ktorý jednoznačne rozlíši ich pôvod. Rovnako sa pôvodná európska alebo národná klasifikácia nesmie prepísať výsledkom miestnej korekcie; obe hodnoty sa musia uchovať samostatne.

Odporúčaná logická štruktúra zahŕňa najmenej tieto časti:

- zdrojové údaje v pôvodnom stave;
- pracovné vrstvy po geometrickej a atribútovej kontrole;
- terénne plochy, transekty a odberové miesta;
- vrstvy základných porastových a topografických charakteristík;
- vrstvy povrchového, rebríkového a korunového paliva;
- relačné tabuľky klasifikačných pravidiel a prevodov;
- dátový slovník parametrov, kódov polí, jednotiek a prípustných hodnôt;
- kalibračné a nezávislé overovacie súbory;
- vrstvy neistoty, kvality a dátovej dôveryhodnosti;
- záznam pôvodu a spôsobu odvodenia jednotlivých hodnôt;
- metadáta, záznamy verzií a protokoly spracovania.

Jednotlivé tabuľky a vrstvy musia byť previazané jednoznačnými identifikátormi. Kód pol'a má byť krátky, stabilný, v slovenskom jazyku a zapisovaný bez diakritiky. Jeho úplný význam, jednotka, dátový typ,

prípustný rozsah hodnôt, spôsob vzniku a verzia definície sa uvedú v dátovom slovníku. Identifikátor analytickej jednotky nesmie obsahovať odbornú interpretáciu, ktorá by sa mohla po aktualizácii zmeniť.

Pri výbere formátu je vhodné uprednostniť riešenie, ktoré podporuje priestorové indexy, jednoznačné dátové typy, dlhé názvy polí, relačné väzby a prácu s metadátami. Pri výmene údajov možno využívať bežné vektorové a rastrové formáty, ale hlavná pracovná databáza má zostať konzistentná a verziovaná.

Každý vstup sa pred ďalším použitím podrobí geometrickej, atribútovej, tematickej a časovej kontrole. Geometrická kontrola overuje platnosť objektov, polohu, prekryvy, medzery a topologické chyby. Atribútová kontrola zisťuje chýbajúce hodnoty, duplicity, neplatné kódy a hodnoty mimo fyzikálne alebo odborne prípustného rozsahu.

Tematická kontrola je rovnako dôležitá ako technická. Vrstva môže byť geometricky bezchybná, ale nevhodná na zamýšľaný účel. Napríklad údaj o korunovej pokrývnosti nemožno bez overenia použiť ako objemovú hustotu korunového paliva a vegetačný index nemožno interpretovať ako priamo meranú vlhkosť povrchového paliva.

Časová kontrola preveruje dátum alebo obdobie, ktoré údaj reprezentuje. Ak medzi dvoma vstupmi nastala ťažba, poškodenie porastu, požiar alebo iná významná zmena, vrstvy sa nesmú spojiť bez zohľadnenia tejto udalosti. Pri dynamických údajoch, najmä pri vlhkosti paliva a meteorologických premenných, sa kontroluje aj presný čas platnosti.

Výsledkom vstupnej kontroly musí byť protokol kvality, v ktorom sa pre každú vrstvu uvedie, či bola prijatá bez zmeny, opravená, časovo obmedzená, použitá iba ako pomocný údaj alebo vyradená.

Pri národnom spracovaní sa všetky pracovné vrstvy prevádzajú do spoločného súradnicového referenčného systému. Pre národné spracovanie sa ako spoločný pracovný súradnicový referenčný systém navrhuje S-JTSK / Krovak East North (EPSG: 5514), , príp. novší S-JTSK03 / Krovak East North (EPSG: 8353), ak je tento systém zhodný alebo kompatibilný s použitými národnými referenčnými údajmi. Pôvodný súradnicový referenčný systém každého zdroja sa musí zachovať v metadátach.

Transformácia súradníc sa vykonáva iba raz v kontrolovanom pracovnom postupe. Opakované prevody medzi viacerými systémami môžu viesť k zbytočným polohovým odchýlkam a k rozdielom pri zarovnaní rastrov. Pri vektorových vrstvách sa po transformácii kontrolujú najmä hranice porastov, malé polygóny a líniové prvky.

Pri údajoch s výškovou zložkou sa musí kontrolovať aj použitý výškový systém. Výška porastu odvodená ako rozdiel medzi modelom povrchu a modelom reliéfu je správna iba vtedy, ak oba modely používajú porovnateľnú výškovú referenciu a pochádzajú z metodicky kompatibilného spracovania.

Samotné priradenie správneho kódu súradnicového systému k súboru nie je transformáciou. Ak je geometria uložená v inom systéme, musí sa skutočne prepočítať. Nesprávne označenie bez transformácie môže posunúť vrstvu aj viac ako o stovky metrov a znehodnotiť celý analytický postup.

Pred rastrovým spracovaním sa stanoví presný priestorový rozsah pracovnej databázy. Na národnej úrovni môže ísť o územie Slovenskej republiky rozšírené podľa potreby o malý okraj na spracovanie susedných buniek. Pri regionálnom alebo lokálnom spracovaní sa použije hranica hodnoteného územia, podľa potreby rozšírená o malý okraj.

Všetky rastre musia mať zhodný začiatok mriežky, orientáciu, veľkosť bunky a priestorový rozsah. Nestačí, aby mali rovnakú deklarovanú veľkosť bunky. Ak sú mriežky navzájom posunuté, pri bunkových operáciách vzniknú systematické rozdiely.

Jedna referenčná rastrová mriežka sa preto určí ako šablóna. Ostatné vrstvy sa k nej zarovnávajú. Táto šablóna definuje hranice buniek, veľkosť bunky, súradnicový systém, rozsah a spôsob reprezentácie chýbajúcich hodnôt.

Pracovná bunka 10 × 10 m môže byť použitá ako spoločný technický rámec tam, kde je to v súlade s cieľom mapovania. Neznamená však, že všetky vstupy majú desaťmetrovú informačnú podrobnosť. Pôvodné rozlíšenie každej vrstvy zostáva povinnou súčasťou metadát.

Spôsob prevzorkovania sa musí prispôbiť významu údajov. Pri zmene geometrie alebo rozlíšenia kategorizovaných rastrov sa musí použiť postup, ktorý zachováva pôvodný význam kategórií. Pri prevzorkovaní na porovnateľnú alebo jemnejšiu mriežku možno použiť metódu najbližšieho suseda; pri agregácii na hrubšie rozlíšenie sa podľa účelu použije dominantná trieda alebo plošný podiel jednotlivých tried.

Pri spojitých veličinách možno použiť bilineárnu alebo inú vhodnú interpolačnú metódu, ak jej použitie zodpovedá fyzikálnemu významu parametra. Pri veľmi členitých údajoch alebo pri produktoch, pri ktorých je dôležité zachovať extrémny, sa musí vopred posúdiť, či vyhladzovanie nespôsobí stratu relevantnej informácie.

Pri agregácii jemnejšieho rastra do hrubšej mriežky sa nepoužíva univerzálne jedno pravidlo. Pre spojitú plošné charakteristiky je často vhodný priemer alebo medián. Pre množstvo reprezentujúce súčet môže byť potrebné plošné sčítanie. Pri kategóriách sa používa dominantná trieda alebo podiel jednotlivých tried.

Pri každej agregácii sa musí evidovať pôvodné priestorové rozlíšenie, výsledná priestorová jednotka a použitá agregáčna funkcia.

Plošne vážený priemer spojitého parametra pri agregácii možno vyjadriť vzťahom (30):

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i A_i}{\sum A_i} \quad (30)$$

kde

$\bar{x}$ – hodnota agregovaného parametra

x_i – hodnota i-tej vstupnej časti

A_i – plocha jej prieniku s výslednou jednotkou

Tento postup je vhodný iba pre veličiny, pri ktorých má priemerovanie vecný význam.

Pri prevode hrubšieho produktu na jemnejšiu mriežku sa nevytvára nová informácia. Jemnejšie bunky iba preberajú alebo interpolujú hodnotu pôvodného produktu. V mapových výstupoch a metadátach sa preto nesmie uvádzať iba výsledná veľkosť bunky bez informácie o pôvodnom rozlíšení.

Kategorizované a spojitú premennú sa v geodatabáze vedú oddelene. Kategória vyjadruje príslušnosť k triede, napríklad typ povrchového paliva alebo triedu vertikálnej kontinuity. Spojitá hodnota vyjadruje

meranú alebo modelovanú veličinu, napríklad množstvo paliva, výšku porastu alebo objemovú hustotu korunového paliva.

Ak sa spojitá hodnota prevádza do tried, pôvodná číselná hodnota sa nesmie odstrániť. Trieda je odvodený údaj a jej hranice sa môžu v budúcnosti zmeniť. Zachovanie pôvodnej hodnoty umožňuje znovu klasifikovať údaje bez opakovania celého odvodenia.

Pri kategóriách sa má viesť stabilný číselník s jednoznačným kódom, slovenským názvom, opisom a platnosťou. Zmena významu existujúceho kódu nie je prípustná; pri metodickej zmene sa vytvorí nová verzia číselníka.

Chýbajúca hodnota sa musí odlišovať od nulovej hodnoty. Nula znamená, že parameter bol hodnotený a jeho množstvo alebo zastúpenie bolo nulové. Chýbajúca hodnota znamená, že parameter nebol zistený alebo ho nebolo možné spoľahlivo zistiť alebo určiť.

Pri rastrových údajoch sa pre chýbajúce hodnoty používa osobitné označenie. Pri vektorových tabuľkách sa používa nulová databázová hodnota, nie číselná nula alebo prázdny textový reťazec. Toto rozlíšenie je nevyhnutné pri výpočte priemerov a ďalších štatistík.

Doplnenie chýbajúcich hodnôt je samostatná modelová operácia. Môže byť založené na terénnom doplnení, priestorovom modeli, priradení podľa palivového typu alebo inom odborne zdôvodnenom postupe. Doplnená hodnota musí mať samostatne evidovaný pôvod a neistotu.

Pri mapovej algebre sa musí vopred určiť, ako sa má správať bunka, v ktorej chýba jeden zo vstupov. Automatické nahradenie chýbajúcej hodnoty nulou môže viesť k systematickému podhodnoteniu paliva alebo výsledného ukazovateľa.

Vektorové vrstvy sa prepájajú pomocou jednoznačných identifikátorov alebo priestorového vzťahu. Atribútové spojenie sa uprednostňuje tam, kde existuje stabilný spoločný identifikátor. Priestorový prienik sa používa vtedy, keď je potrebné vytvoriť novú analytickú jednotku z viacerých nezávislých priestorových členení.

Pri prieniku porastovej, typologickej a ďalšej tematickej vrstvy môžu vzniknúť veľmi malé polygóny spôsobené nepresnosťou hraníc. Tieto fragmenty sa nesmú automaticky odstraňovať bez kontroly. Najskôr sa musí určiť, či predstavujú reálnu priestorovú situáciu alebo iba geometrický rozdiel medzi zdrojmi.

Ak sa malé fragmenty generalizujú, musí byť stanovené pravidlo podľa minimálnej plochy, susednosti a tematickej podobnosti. Každá generalizácia mení pôvodnú geometriu a musí byť zaznamenaná v protokole spracovania.

Pri priradovaní bodových terénnych meraní k polygonálnym jednotkám sa kontroluje ich poloha voči hranici. Bod ležiaci tesne pri hranici môže byť v dôsledku polohovej chyby priradený nesprávnej jednotke. V takom prípade je vhodné použiť informáciu o polohovej presnosti a terénny opis.

Zonálne spracovanie umožňuje odvodiť charakteristiky rastrových údajov pre porastové, typologické alebo iné polygonálne jednotky. Použiť možno priemer, medián, smerodajnú odchýlku, minimum, maximum, percentily alebo podiel buniek patriacich do určitej triedy.

Výber štatistiky sa musí riadiť významom parametra. Pri výške porastu môže byť vhodný horný percentil, pri priemernej korunovej pokrývosti priemer alebo medián a pri identifikácii lokálne vysokého rebríkového paliva môže byť dôležitejší horný kvantil než priemerná hodnota.

Pri vrstve s kategorizovanými údajmi je vhodné ukladať nielen dominantnú triedu, ale aj podiel plochy jednotlivých tried. Jedna porastová jednotka môže byť palivovo heterogénna a dominantná trieda nemusí vystihnúť menšinový, ale priestorovo významný pás paliva.

Podiel plochy patriacej do k -tej kategórie možno pri rovnako veľkých rastrových bunkách vyjadriť (31):

$$p_k = \frac{n_k}{n} \quad (31)$$

kde

p_k – podiel k -tej kategórie,

n_k – počet buniek k tejto kategórie v hodnotenej jednotke

n – celkový počet platných buniek.

Ak majú vstupné časti rozdielnu plochu, musí sa namiesto počtu použiť plošné váženie.

Pri klasifikačných a regresných postupoch môže byť potrebné previesť spojitú vysvetľujúcu premennú na porovnateľnú číselnú mierku. Takáto úprava sa však vykonáva iba v analytickej kópii údajov. Pôvodné hodnoty v odborných jednotkách sa zachovávajú.

Jednou z možností je štandardizácia vzhľadom na priemer a smerodajnú odchýlku (32):

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (32)$$

kde

z – štandardizovaná hodnota

x – pôvodná hodnota

μ – priemer

σ – smerodajná odchýlka príslušnej premennej v kalibračnom súbore

Parametre štandardizácie sa určujú iba z kalibračných údajov a rovnaké hodnoty sa použijú na overovacie aj výsledné priestorové dáta.

Pri modeloch, ktoré štandardizáciu nevyžadujú, sa tento krok nevykonáva. Automatické normalizovanie všetkých vrstiev bez väzby na použitú metódu by znižovalo transparentnosť a mohlo by sťažiť odbornú interpretáciu.

Z DMR sa podľa účelu odvodzuje najmä nadmorská výška, sklon, orientácia svahu a vybrané charakteristiky topografickej polohy. Tieto vrstvy nevystupujú ako palivové parametre, ale ako vysvetľujúce premenné pri priestorovom modelovaní a ako samostatné vstupy pri modelovaní správania požiaru.

Pri odvodení sklonu a orientácie je rozhodujúca kvalita a rozlíšenie modelu reliéfu. Veľmi podrobný model môže zachytiť malé terénne nerovnosti, ktoré nie sú relevantné pre celoštátne modelovanie. Podľa účelu

preto môže byť vhodné pred výpočtom použiť riadenú agregáciu alebo vypočítať charakteristiky pre väčšie okolie.

Z laserového skenovania sa odvodzujú normalizované výšky vegetácie, výškové percentily, korunová pokrývnosť a hustota návratov v jednotlivých výškových intervaloch. Všetky odvodené metriky musia používať rovnakú definíciu terénnej výšky a rovnaké priestorové okno ako pri kalibračnom spracovaní (Andersen, McGaughey a Reutebuch 2005; Campbell et al., 2018).

Pri výške korunovej bázy a rebríkovom palive je potrebné zachovať informáciu o vertikálnom profile. Jediný priemer môže prekryť lokálnu palivovú vrstvu, ktorá vytvára spojenie medzi povrchom a korunou. Preto je vhodné v pracovnej databáze uchovať aj pomocné výškové intervaly alebo ukazovatele vertikálnej kontinuity (Viedma et al., 2024).

Optické a radarové snímky sa pred použitím musia spracovať jednotným a dokumentovaným spôsobom. Pri optických údajoch sa kontroluje oblačnosť, tieň, sneh, atmosférická korekcia a fenologické obdobie. Pri radarových údajoch sa kontroluje kalibrácia, geometrická korekcia, potlačenie šumu a jednotnosť geometrie snímania.

Do modelovania sa majú používať iba obrazové prvky označené ako platné. Oblaky, tieň oblakov, sneh a iné nevhodné plochy sa nesmú nahrádzať nulovou hodnotou. Vytvorí sa samostatná maska kvality, ktorá sa používa pri všetkých následných výpočtoch.

Časové rady sú vhodnejšie než jedna náhodne vybraná snímka, ak je cieľom odlíšiť sezónne vegetačné správanie alebo zachytiť zmeny po zásahu. Pri tvorbe časových súhrnov sa musí uviesť obdobie, počet platných pozorovaní a použitá štatistika.

Spektrálne a radarové premenné sa nesmú interpretovať ako priame meranie množstva paliva. V geodatabáze sa vedú ako vysvetľujúce premenné a ich vzťah ku konkrétnemu palivovému parametru sa musí odvodiť a overiť samostatným modelovým postupom. V geodatabáze sa vedú ako vysvetľujúce premenné a ich vzťah ku konkrétnemu palivovému parametru sa hodnotí v samostatnom modelovom kroku.

Pri laserovom skenovaní sa najskôr kontroluje klasifikácia bodov terénu a vegetácie. Chyby v terénnej triede sa prenášajú do všetkých normalizovaných výšok a môžu významne ovplyvniť odhad výšky vegetácie pri zemi.

Výška každého bodu vegetácie sa normalizuje voči miestnej výške terénu. Následne sa body sumarizujú do priestorových buniek alebo objektov podľa vopred definovaného pracovného okna. Vypočítavajú sa percentily výšky, podiel bodov v jednotlivých výškových pásmach, hustota vegetácie a ďalšie metriky potrebné na odhad korunového a rebríkového paliva.

Pri porovnávaní rôznych cyklov laserového skenovania sa musí kontrolovať hustota bodov, ročné obdobie snímania a technické parametre zberu. Rozdiel v počte návratov zo spodnej vegetácie môže súvisieť s parametrami zberu a tienением nadúrovňovou vegetáciou, a preto nemusí predstavovať skutočnú zmenu palivovej vrstvy (Campbell et al., 2018).

Objemová hustota korunového paliva a plošné množstvo korunového paliva sa z geometrie mračna bodov neurčujú priamo. Lidar metriky opisujú geometrickú a vertikálnu štruktúru vegetácie a na ich prevod na hmotnostné charakteristiky korunového paliva je potrebné vytvoriť modelový vzťah k terénnym

inventarizačným alebo alometricky odvodeným údajom. Výsledný model sa musí následne overiť na nezávislých referenčných údajoch (Andersen, McGaughey a Reutebuch, 2005).

Analytická jednotka je priestorová jednotka, ku ktorej sa viažu všetky údaje potrebné na klasifikáciu alebo kvantifikáciu paliva. Jej definícia musí byť stabilná počas jedného spracovateľského cyklu a musí umožňovať spätné priradenie k pôvodným porastovým a ďalším tematickým jednotkám.

Analytickú jednotku možno vytvoriť ako rastrovú bunku, objekt odvodený zo segmentácie alebo polygonálny prienik vybraných zdrojových vrstiev. Výber závisí od účelu. Pre modelovanie a mapovú algebru je praktická pravidelná mriežka. Pre hospodárske plánovanie je významné zachovať väzbu na jednotky priestorového rozdelenia lesa.

Pri terénne kalibrovanom spracovaní sa musí zachovať väzba medzi analytickou jednotkou, referenčnou terénnou plochou a jednotlivými čiastkovými meraniami, z ktorých boli jej parametre odvodené. Rozdielna priestorová podpora týchto údajov sa musí evidovať samostatne.

Pri polygonálnom prieniku viacerých vrstiev sa musí zabrániť nekontrolovanému vzniku veľkého počtu drobných fragmentov. Analytická jednotka má odrážať skutočnú tematickú zmenu, nie geometrickú nepresnosť hraníc medzi nezávislými zdrojmi.

Každá jednotka dostane jednoznačný slovenský identifikátor, ktorý sa používa vo všetkých relačných tabuľkách a pri odvodených výstupoch. V identifikátore sa nemá kódovať finálna palivová trieda, pretože tá sa môže pri aktualizácii zmeniť.

Predbežné zaradenie povrchového paliva sa vykonáva podľa pravidiel vytvorených v podkapitole 2.5. V databáze sa samostatne uchováva pôvodný typ porastu, typologická informácia, merané a odvodené charakteristiky palivového profilu, slovenský palivový typ a podľa účelu aj referenčný alebo odvodený palivový model.

Palivový typ ani palivový model sa nesmú určiť jednoduchým prepísaním pôvodnej vegetačnej, typologickej alebo lesníckej klasifikácie. Musia byť odvodené z relevantných charakteristík palivového profilu podľa explicitných klasifikačných alebo prevodových pravidiel. Každé odvodené zaradenie musí mať zaznamenanú použitú verziu pravidla a zdroj vstupných údajov.

Osobitnú kontrolu vyžadujú mladiny, rúbaniská, plochy po poškodení lesa, porasty s vysokým zastúpením krovín a lokality s výrazným množstvom ležiaceho dreva. V týchto situáciách môže byť všeobecná vegetačná alebo typologická trieda nedostatočná na opis aktuálneho povrchového paliva.

Pri neistom zaradení sa má uviesť príznak neistoty alebo sekundárna možná trieda. Nútené jednoznačné priradenie bez zodpovedajúcej dátovej podpory by vytváralo falošný dojem presnosti.

Kvantitatívne parametre sa odvodzujú samostatne podľa jednotlivých palivových vrstiev. Množstvo povrchového paliva, hĺbka palivového lôžka a množstvo ležiaceho dreva sú založené na terénnych meraniach a na lokálne alebo regionálne kalibrovaných vzťahoch. Rebríkové palivo sa opisuje pomocou vertikálneho profilu vegetácie a jeho terénneho alebo lidarového odvodenia. Korunové parametre sa podľa charakteru veličiny získavajú priamym meraním, geometrickým odvodením alebo modelovaním z porastových, lidarových a alometrických údajov.

Pri každej odvodennej hodnote sa eviduje zdrojová metóda. Hodnota priradená podľa palivového typu má inú výpočtovú hodnotu než hodnota predikovaná lokálne kalibrovaným modelom. Tento rozdiel musí zostať zachovaný v databáze aj po vytvorení výslednej mapy.

Odvodené parametre sa kontrolujú voči fyzikálne a biologicky prípustným intervalom. Hodnota výšky korunovej bázy vyššia než výška porastu, záporné množstvo paliva alebo korunová pokrývnosť mimo intervalu 0 až 100 % sa musí označiť ako chyba a nie iba automaticky upraviť na hraničnú hodnotu.

Ak sa parameter počíta z viacerých odvodených vstupov, neistota sa spravidla zvyšuje. Preto sa má podľa možnosti viesť nielen výsledná hodnota, ale aj kvalita jednotlivých vstupov a spôsob, akým boli skombinované.

Po odvodení parametrov sa vykoná kontrola vzájomných logických vzťahov. Táto kontrola dokáže odhaliť chyby, ktoré jednoduché preverenie povoleného rozsahu jednotlivých polí nezachytí.

Kontroluje sa napríklad, či výška korunovej bázy nepresahuje výšku porastu, či hĺbka korunovej vrstvy nie je záporná, či súčet podielov kategórií zodpovedá definovanému rozsahu, či dátum aktualizácie nie je starší než zdrojový údaj a či označenie plochy bez významného povrchového paliva nie je v rozpore so zadaným vysokým množstvom paliva.

Pri kategorizovaných kombináciách je možné vytvoriť pravidlá prípustnosti. Niektoré kombinácie nie sú nemožné, ale vyžadujú odbornú kontrolu. Takéto záznamy sa označia príznakom na revíziu namiesto automatického vymazania.

Pri celoštátnom spracovaní je vhodné opakované operácie automatizovať. Automatizácia znižuje počet ručných zásahov, zabezpečuje rovnaké pravidlá pre celé územie a uľahčuje aktualizáciu po získaní nových vstupných údajov.

Automatizovaný postup musí byť parametrizovaný. Názvy vstupov, pracovný súradnicový systém, veľkosť bunky, spôsob prevzorkovania, hranice klasifikačných tried a ďalšie nastavenia sa nemajú skrývať v nezdokumentovaných manuálnych krokoch.

Každé spustenie má vytvoriť záznam dátumu, verzie pracovného postupu, použitých vstupov a základných kontrolných výsledkov. Ak sa zmení metodika, vytvorí sa nová verzia, pričom predchádzajúca verzia zostane reprodukovateľná.

Automatizácia nenahrádza odbornú kontrolu. Výsledné mapy sa musia vizuálne a štatisticky preveriť, najmä v oblastiach, kde sa stretávajú rozdielne zdroje údajov alebo kde model extrapoluje mimo terénne reprezentovaných podmienok.

Neistota nevzniká až v poslednom kroku. Súvisí s polohou terénnej plochy, presnosťou merania, vekom vstupnej vrstvy, priestorovým rozlíšením, klasifikáciou, prevzorkovaním a modelovým odvodením. Preto sa má zaznamenávať priebežne počas celého spracovania.

Vhodné je oddeliť aspoň kvalitu zdroja, časovú aktuálnosť, priestorovú podporu a modelovú neistotu. Výsledná vrstva dátovej podpory a neistoty môže tieto informácie spájať, jednotlivé zložky však musia zostať dostupné na samostatnú interpretáciu.

Pri klasifikačných výstupoch môže byť neistota vyjadrená pravdepodobnosťou alebo mierou istoty zaradenia. Pri spojitých parametroch možno používať chybu predikcie, interval neistoty alebo triedu kvality odvodenú z overovacích údajov.

Ak pre určitú časť územia nie je možné neistotu kvantifikovať, uvedie sa aspoň kvalitatívna trieda a dôvod. Neistá hodnota nemá byť skrytá len preto, aby výsledná mapa pôsobila vizuálne súvislo.

Pred vytvorením finálnych rastrových a vektorových vrstiev sa vykoná komplexná kontrola. Tá zahŕňa kontrolu úplnosti územia, chýbajúcich údajov, extrémnych hodnôt, hraníc klasifikačných tried, logických väzieb medzi atribútmi a súladu s nezávislými terénnymi údajmi.

Vizuálna kontrola zostáva dôležitou súčasťou postupu. Umožňuje odhaliť pruhy po nesprávnom spájaní rastrov, posuny vrstiev, ostré administratívne hranice v údajoch, kde by nemali existovať, opakujúce sa blokové vzory po nevhodnom prevzorkovaní alebo neprimerane homogénne výsledky.

Kontrolovať treba aj správanie modelu na hraniciach rozsahu vstupných údajov. Ak sa vysoké alebo nízke hodnoty koncentrujú najmä tam, kde chýbali terénne plochy, výsledok môže byť dôsledkom extrapolácie a nie skutočnej palivovej situácie.

Po ukončení kontroly sa analytické vrstvy uzamknú ako konkrétna verzia a až z nich sa vytvárajú mapové produkty opísané v nasledujúcej podkapitole. Tým sa oddelí analytické spracovanie od formátovania a distribúcie výsledných rastrových a vektorových vrstiev (tabuľka 6).

Tabuľka 6 Odporúčaný pracovný postup spracovania

Krok	Hlavná operácia	Kontrola	Výstup
1	uloženie pôvodných zdrojov	úplnosť, formát, dátum a pôvod	nemenná zdrojová vrstva
2	geometrická a atribútová kontrola	platnosť geometrie, kódy, rozsahy hodnôt	kontrolovaná pracovná vrstva
3	transformácia súradnicového systému	poloha a súlad s referenčnými vrstvami	priestorovo zosúladené údaje
4	zarovnanie rastrov	rozsah, veľkosť a poloha buniek	spoločná pracovná mriežka
5	prevzorkovanie a agregácia	vhodnosť metódy podľa typu veličiny	harmonizované vrstvy
6	prepojenie terénnych a priestorových údajov	podporná plocha a časová zhoda	kalibračná matica
7	odvodenie pomocných premenných	odborná relevantnosť a kvalita vstupov	vysvetľujúce vrstvy
8	odvodenie palivových parametrov a následná klasifikácia	fyzikálne rozsahy, logické väzby a klasifikačné pravidlá	analytické palivové parametre a odvodené triedy
9	odhad neistoty a dátovej podpory	nezávislé overenie	vrstvy kvality a neistoty
10	záverečná kontrola a verzovanie	úplnosť a reprodukovateľnosť	uzavretá analytická verzia

Spracovanie v geografických informačných systémoch musí zostať transparentným prechodom medzi terénnym zisťovaním a mapovým výstupom. Každá výsledná hodnota musí byť spätne vysvetliteľná pomocou vstupného zdroja, použitej transformácie, klasifikačného alebo kvantifikačného pravidla a údajov o neistote. Primárnym analytickým výsledkom spracovania je súbor priestorovo viazaných palivových parametrov s evidovaným pôvodom, spôsobom odvodenia a neistotou; palivové typy, klasifikačné triedy a palivové modely predstavujú následné odvodené výstupy. Iba tak možno palivovú geodatabázu

opakovane aktualizovať a odborne používať pri hodnotení rizika vzniku požiaru a modelovaní správania sa požiaru.

2.9. Tvorba rastrových a vektorových vrstiev

Tvorba rastrových a vektorových vrstiev predstavuje výstupnú fázu metodického rámca mapovania lesného paliva. Na rozdiel od podkapitoly 2.8, ktorá sa sústreďuje na kontrolu, harmonizáciu a analytické spracovanie vstupných údajov, táto časť určuje spôsob vytvorenia finálnych priestorových vrstiev, ich tematický obsah, priestorové rozlíšenie, atribútovú štruktúru a pravidlá dokumentácie.

Výsledná vrstva nemá byť chápaná iba ako grafický mapový podklad. Predstavuje priestorovo a tematicky definovaný údaj, ktorý musí byť opakovateľne použiteľný v ďalšom modelovaní, pri hodnotení rizika vzniku požiaru, pri plánovaní preventívnych opatrení a pri aktualizácii poznatkovej bázy o lesnom palive. Každá vrstva preto musí mať jednoznačne určený odborný význam, dátový typ, jednotku, časovú platnosť, zdroj a mieru neistoty.

Rastrové a vektorové výstupy sa navzájom dopĺňajú. Raster je vhodný na priestorovo súvislé vyjadrenie kvantitatívnych alebo kategóriových palivových charakteristík, na mapovú algebru a modelovanie. Vektorové vrstvy sú vhodné na zachovanie hraníc porastových a administratívnych jednotiek, evidenciu terénnych plôch, líniových prerušení paliva, lokálnych objektov a výsledkov agregovaných na jednotky priestorového rozdelenia lesa.

Finálne vrstvy sa vytvárajú iba z analytických údajov, ktoré prešli kontrolou podľa podkapitoly 2.8. Pôvodné zdrojové vrstvy sa neprepisujú. Každý výstup má samostatný identifikátor, číslo verzie a dátum vytvorenia.

Pri tvorbe výstupov sa musia zachovať štyri základné zásady: tematická jednoznačnosť, priestorová konzistentnosť, časová identifikovateľnosť a sledovateľnosť pôvodu. Vrstva má reprezentovať jednu jasne definovanú vlastnosť alebo jednu odbornú klasifikáciu. Ak sa spája viacero parametrov, musí byť presne uvedený spôsob ich kombinácie.

Výstupná veľkosť bunky, polygonálna jednotka ani grafická symbolika nesmú vytvárať dojem vyššej presnosti, než akú umožňujú vstupné údaje. Výsledok s pracovným rastrom 10 × 10 m môže obsahovať hodnoty odvodené z údajov s hrubšou informačnou podrobnosťou; táto skutočnosť sa musí uviesť v metadátach a v prípade potreby aj vo vrstve kvality.

Rastrové vrstvy sa odporúča členiť podľa palivovej vrstvy a podľa typu informácie. Samostatne sa vytvárajú rastre povrchového, rebríkového a korunového paliva, pričom sa oddeľujú kategorizované vrstvy od spojitých kvantitatívnych parametrov.

Základný súbor rastrových výstupov môže obsahovať najmä:

- typ povrchového paliva;
- dominantný nositeľ povrchového šírenia;
- množstvo jemného odumretého povrchového paliva;
- množstvo bylinného paliva;
- množstvo krovinového paliva;
- množstvo hrubého ležiaceho dreva;

- plošné množstvo korunového paliva;
- horizontálnu kontinuitu povrchového paliva;
- triedu rebríkového paliva;
- vertikálnu kontinuitu paliva;
- výšku porastu;
- výšku korunovej bázy;
- hĺbku korunovej vrstvy;
- korunovú pokryvnosť;
- plošné množstvo korunového paliva;
- objemovú hustotu korunového paliva;
- horizontálnu kontinuitu korún;
- vlhkosť vybraných palivových komponentov pre konkrétny dátum alebo scenár;
- vrstvu pôvodu údajov;
- vrstvu dátovej podpory a/alebo neistoty.

Jednotlivé palivové parametre sa nemajú zlučovať do jedinej všeobecnej vrstvy paliva. Oddelené vedenie umožňuje ich rozdielne využitie pri hodnotení iniciácie, povrchového šírenia, vertikálneho prechodu a korunového požiaru. Súčasne uľahčuje aktualizáciu iba tej časti údajov, ktorá sa skutočne zmenila.

Pre priestorovo súvislé mapovanie sa používa jednotná referenčná mriežka. V podmienkach navrhovanej metodiky môže mať pracovná bunka rozmery 10 × 10 m. Všetky finálne rastrové vrstvy určené na spoločnú analýzu musia mať zhodný súradnicový systém, veľkosť bunky, orientáciu a polohu hraníc buniek.

Veľkosť 10 × 10 m predstavuje technické rozlíšenie výstupu. Neznamená, že každý parameter bol s rovnakou podrobnosťou zistený alebo overený. Preto sa ku každej výslednej bunke alebo celej vrstve eviduje pôvodné rozlíšenie vstupov a spôsob odvodenia hodnoty. Ak je výsledná hodnota odvodená zo zdroja s hrubšou priestorovou podporou, má sa táto informácia viesť buď v atribúte pôvodu, v samostatnej vrstve dátovej podpory alebo v metadátach produktu.

Pri celoštátnom mapovaní je dôležité použiť rovnakú referenčnú mriežku pre všetky aktualizáčny cykly. Zmena polohy začiatku mriežky by spôsobila, že bunky z rozdielnych rokov by sa pri porovnaní neprekrývali presne a analýza zmeny by bola ovplyvnená technickým posunom.

Kategorizované rastre obsahujú celočíselný kód triedy. Každý kód musí byť previazaný so stabilným číselníkom, v ktorom je uvedený slovenský názov, odborná definícia, pravidlo priradenia a verzia klasifikácie.

Do kategorizovaných vrstiev patria napríklad typ povrchového paliva, dominantný nositeľ šírenia, trieda rebríkového paliva, trieda horizontálnej kontinuity alebo trieda dátovej dôveryhodnosti.

Grafické farby ani textové názvy sa nemajú ukladať ako základná analytická hodnota. Primárnou hodnotou bunky je kód. Symbolika sa vedie samostatne, aby bolo možné mapu zobrazíť rozdielnymi spôsobmi bez zmeny samotného obsahu.

Chýbajúca alebo neklasifikovaná bunka musí mať samostatné označenie odlišné od platnej triedy s nulovým alebo nízkym významom. Hodnota „bez údajov“ nesmie byť interpretovaná ako „bez paliva“.

Spojité raster obsahuje číselnú hodnotu konkrétneho palivového parametra v stanovenej jednotke. Príkladom je množstvo paliva v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, výška korunovej bázy v metroch alebo objemová hustota korunového paliva v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

V celej vrstve sa používa jedna jednotka. Prevod jednotiek sa nesmie meniť podľa lokality. Ak sa výsledok poskytuje aj v alternatívnej jednotke, vytvorí sa samostatná vrstva alebo jasne označený odvodený produkt.

Počet desatinných miest má zodpovedať skutočnej presnosti údajov. Uvádzanie nadmerného počtu desatinných miest pri modelovanom parametre môže vytvárať dojem presnosti, ktorú vstupné údaje nepodporujú.

Pri spojitých vrstvách sa odporúča viesť aj samostatnú vrstvu neistoty alebo štandardnej chyby odhadu, ak ju použitá metóda umožňuje určiť. Hodnota parametra a jeho neistota predstavujú dve odlišné informácie a nemajú sa ukladať do jedného zloženého kódu.

Vrstva typu povrchového paliva vyjadruje opisnú triedu dominantného palivového komplexu. Má zachovať väzbu na domácu klasifikáciu vytvorenú podľa podkapitoly 2.5 a nesmie sa automaticky stotožňovať so štandardným zahraničným palivovým modelom.

Samostatne sa vytvára vrstva dominantného nositeľa povrchového šírenia. Tá rozlišuje, či sa pri očakávaných podmienkach šírenie viaže predovšetkým na trávnu a bylinné palivo, kroviny, listnatý alebo ihličnatý opad, jemné drevné zvyšky alebo zmiešaný komplex.

Kvantitatívne rastre množstva paliva sa vytvárajú samostatne pre hlavné palivové zložky. Celkové množstvo povrchového paliva môže byť vytvorené ako súhrnná odvodená vrstva, nesmie však nahradiť samostatné zložky, pretože rovnaká celková hmotnosť môže mať rozdielny význam podľa zastúpenia jemného, bylinného, krovinného a hrubého drevného paliva.

Vrstva horizontálnej kontinuity povrchového paliva môže byť vyjadrená triedou alebo spojitým ukazovateľom. Ak sa používajú triedy, ich hranice musia byť rovnaké pre celý výstup a zachované v číselníku.

Rebríkové palivo sa má primárne reprezentovať súborom profilových parametrov a až následne odvodenou kategorizovanou vrstvou triedy rebríkového paliva. Medzi základné výstupy patria výškový rozsah rebríkového paliva, počet obsadených výškových pásiem, veľkosť vertikálnych medzier, ukazovateľ vertikálnej kontinuity a odvodená trieda rebríkového paliva.

Pri viacvrstvových porastoch má osobitný význam zachovanie vertikálneho profilu. Jedna výsledná trieda môže byť praktická pre mapové zobrazenie, ale v pracovnej databáze majú zostať aj podrobnejšie parametre, z ktorých bola odvodená.

Vrstva rebríkového paliva sa nesmie vytvárať iba z výšky korunovej bázy. Funkčnú vertikálnu kontinuitu môžu vytvárať kry, zmladenie, potlačené stromy a suché vetvy aj tam, kde je priemerná korunová báza hlavnej stromovej vrstvy relatívne vysoká.

Korunové palivo sa reprezentuje viacerými vzájomne dopĺňajúcimi vrstvami. Výška porastu opisuje hornú hranicu korunovej vegetácie, výška korunovej bázy spodnú funkčnú hranicu súvislej korunovej vrstvy a hĺbka koruny ich vertikálny rozdiel.

Korunová pokryvnosť vyjadruje horizontálne prekrytie územia korunami. Plošné množstvo korunového paliva vyjadruje suchú hmotnosť dostupného jemného korunového paliva na jednotku pôdorysnej plochy a objemová hustota korunového paliva jeho množstvo na jednotku objemu korunovej vrstvy. Tieto vrstvy nemožno navzájom zamieňať.

Vrstva horizontálnej kontinuity korún môže vychádzať z korunovej pokryvnosti, vzdialenosti medzi korunami alebo z priestorového ukazovateľa prepojenia. Použitý postup musí byť jednotný pre celé hodnotené územie.

Ak je plošné množstvo alebo objemová hustota korunového paliva odvodená alometrickým alebo iným predikčným modelom, musí sa súčasne uchovávať informácia o pôvode hodnoty, použitej metóde a verzii modelu. Modelovaný biometrický odhad sa nesmie interpretovať ako priame meranie.

Vlhkosť paliva sa nevytvára ako nemenná vrstva. Statická palivová vrstva a dynamická vrstva vlhkosti sa musia viesť oddelene a spájajú sa až pri konkrétnom časovo viazanom hodnotení nebezpečenstva vzniku požiaru alebo správania sa požiaru. Ide o časovo viazaný produkt, ktorý musí obsahovať presný dátum alebo obdobie platnosti. Pri dennom alebo hodinovom hodnotení sa dátum a čas uvádzajú priamo v názve alebo metadátach produktu.

Samostatne sa majú viesť vrstvy vlhkosti jemného odumretého povrchového paliva, živého bylinného alebo krovínového paliva a podľa dostupnosti aj jemného korunového paliva. Jedna spoločná hodnota pre celý palivový komplex by zakrývala rozdielnu vlhkosťnú dynamiku jednotlivých zložiek.

Ak je vlhkosť odvodená z meteorologického modelu alebo DPZ, vrstva musí byť označená ako modelový odhad. Terénne merania sa vedú samostatne ako referenčné body alebo plochy.

Terénne údaje sa ukladajú ako bodové, líniové alebo polygónové vektorové objekty podľa charakteru merania. Bod sa používa pre lokalizované odbery a merania, línia pre tranzekty a polygón pre skúšobné plochy s definovanou výmerou. Každý objekt musí mať jednoznačnú väzbu na príslušnú analytickú jednotku alebo referenčnú plochu, ak sa jeho hodnoty používajú pri priestorovom odvodení.

Každý objekt tiež obsahuje jednoznačný identifikátor, dátum a čas merania, typ merania, metódu, informáciu o polohovej presnosti a väzbu na tabuľky s podrobnými výsledkami. Rozsiahle súbory meraní sa nemajú vkladať ako desiatky samostatných stĺpcov, ak je vhodnejšia relačná tabuľka.

Terénna vrstva má zostať referenčnou vrstvou a nesmie byť geometricky generalizovaná iba kvôli krajšiemu mapovému zobrazeniu. Ak sa vytvára zjednodušená prezentačná verzia, originál zostáva zachovaný.

Vektorová vrstva jednotiek priestorového rozdelenia lesa slúži na agregáciu rastrových výsledkov do jednotiek využiteľných v lesníckej praxi. Pôvodná geometria jednotiek sa zachová a palivové charakteristiky sa pripájajú ako odvodené atribúty alebo cez relačnú tabuľku.

Pre každý spojitý parameter možno uviesť priemer, medián, vybrané percentily, minimum, maximum a mieru variability podľa odborného významu. Pri kategorizovaných vrstvách sa uvádza dominantná trieda a plošný podiel jednotlivých tried.

Dominantná trieda sama osebe nestačí pri palivovo heterogénnych porastoch. Okrem priemeru alebo mediánu sa má podľa významu parametra uvádzať aj variabilita a dátové pokrytie jednotky.

Ak napríklad menšia časť jednotky obsahuje súvislý pás vysokého rebríkového paliva, môže byť táto informácia významná napriek tomu, že nevytvára väčšinovú plochu.

Plošný podiel určitej palivovej triedy v polygónovej jednotke možno vyjadriť vzťahom (33):

$$P_k = \frac{A_k}{A} \quad (33)$$

kde

P_k – je plošný podiel k-tej triedy,

A_k – plocha tejto triedy v hodnotenej jednotke

A – celková platná plocha jednotky.

Hodnota sa môže vyjadriť ako podiel od 0 do 1 alebo po vynásobení hodnotou 100 ako percento.

Do menovateľa sa nemajú bez rozlíšenia zahŕňať bunky bez údajov. Odporúča sa preto viesť aj samostatný atribút „pokrytie_dat“, vyjadrujúci podiel platnej plochy použitej pri agregácii. Ak chýbajúce údaje tvoria významnú časť jednotky, musí sa súčasne uviesť percento dátového pokrytia, aby nebola dominantná trieda interpretovaná ako reprezentatívna pre celú plochu.

Samostatnú skupinu predstavujú líniové prvky, ktoré môžu ovplyvňovať horizontálnu kontinuitu paliva alebo prístup k územiu. Patria sem lesné a verejné komunikácie, železnice, vodné toky, protipožiarne pásy, približovacie linky a ďalšie účelovo definované línie.

Každá línia má obsahovať typ prvku, šírku, stav, dátum platnosti a podľa potreby údaj o tom, či predstavuje skutočné prerušenie paliva. Samotná existencia cesty v topografickej databáze neznamená automaticky účinnú bariéru pre šírenie požiaru.

Ak sa z líniového prvku vytvára plošná bariéra pomocou zóny určitej šírky, použitá šírka musí vychádzať zo skutočného rozmeru alebo z presne definovaného metodického pravidla. Vytvorená plocha sa vedie ako odvodená vrstva, nie ako pôvodná geometria komunikácie.

Pre dlhodobú udržateľnosť palivovej databázy je vhodné vytvoriť vektorovú alebo rastrovú vrstvu udalostí, ktoré môžu meniť palivový komplex. Patria sem ťažba, pestovný zásah, vetrové alebo snehové poškodenie, poškodenie podkôrnym hmyzom, požiar a rozsiahle odumieranie vegetácie.

Vrstva udalostí nepredstavuje novú palivovú klasifikáciu. Služi na identifikáciu území, na ktorých je potrebné opätovne overiť platnosť existujúcich palivových parametrov.

Záznam udalosti má obsahovať dátum alebo obdobie, typ udalosti, zdroj informácie, priestorový rozsah a stav následného spracovania plochy. Táto vrstva slúži ako spúšťač kontroly platnosti palivových vrstiev.

Po významnej udalosti sa nemá automaticky meniť každá palivová hodnota podľa jedného pevného pravidla. Udalosť označí územie na opätovné hodnotenie, pričom konkrétna aktualizácia závisí od typu a intenzity zmeny.

Každá významná tematická vrstva má byť doplnená o informáciu o pôvode hodnoty. Základný kód pôvodu má rozlišovať priamo meranú, odvodenú, modelovanú a klasifikačne priradenú hodnotu. Samostatný podrobnejší atribút môže uviesť konkrétnu metódu, napríklad lokálny model, regionálny model, alometrický výpočet, externý produkt alebo odborné pravidlo.

Vrstva kvality môže vyjadrovať kombináciu aktuálnosti, priestorovej podpory a výsledkov overenia. Ak sa používa zložená trieda kvality, musí byť v metadátach presne vysvetlené, z ktorých zložiek vznikla.

Pri spojitých predikciách sa má podľa možností poskytovať samostatná vrstva modelovej neistoty. Pri klasifikácii možno poskytovať pravdepodobnosť alebo mieru istoty priradenia k finálnej triede.

Používateľ výsledku musí mať možnosť rozlíšiť oblasť s kvalitným lokálnym overením od oblasti, kde rovnaká grafická hodnota vznikla extrapoláciou alebo prevzatím hrubšieho produktu.

Tabuľka 7 Odporúčané názvy rastrových vrstiev

Názov vrstvy	Kód vrstvy	Typ hodnoty	Jednotka	Obsah
Typ povrchového paliva	typ_povrch	kategória	kód	Opisná palivová trieda
Dominantný nositeľ šírenia	nositel_sir	kategória	kód	Zložka riadiaca povrchové šírenie
Množstvo jemného paliva	mnoz_jem	spojitá	kg·m ⁻²	Množstvo jemného odumretého povrchového paliva
Množstvo bylinného paliva	mnoz_byl	spojitá	kg·m ⁻²	Množstvo živého a odumretého bylinného paliva
Množstvo krovínového paliva	mnoz_krov	spojitá	kg·m ⁻²	Množstvo jemnej krovínovej biomasy
Množstvo hrubého dreva	mnoz_drevo	spojitá	kg·m ⁻²	Množstvo hrubého ležiaceho dreva
Hĺbka palivového lôžka	hlb_lozko	spojitá	m	Zvislý rozsah povrchovej palivovej vrstvy
Kontinuita povrchového paliva	spojit_pov	kategória/ukazovateľ	kód alebo bezrozmerné	Horizontálne prepojenie povrchového paliva
Výškový rozsah rebríkového paliva	rozsah_rebr	spojitá	m	Rozsah medzi najnižšou a najvyššou funkčne významnou vrstvou rebríkového paliva
Počet obsadených výškových pásiem	pocet_vrst	diskrétna	počet	Počet výškových pásiem s prítomnosťou funkčne významného paliva
Najväčšia vertikálna medzera	medzera_vrst	spojitá	m	Najväčšie zvislé prerušenie medzi funkčne významnými palivovými vrstvami
Vertikálna kontinuita	spojit_zvis	kategória/ukazovateľ	kód alebo bezrozmerné	Miera zvislého prepojenia povrchového, rebríkového a korunového paliva

Názov vrstvy	Kód vrstvy	Typ hodnoty	Jednotka	Obsah
Trieda rebríkového paliva	tried_rebr	kategória	kód 1–5	Odvođená trieda vertikálnej kontinuity rebríkového paliva
Výška porastu	vyska_por	spojitá	m	Charakteristická výška porastu
Výška korunovej bázy	vyska_kor_b	spojitá	m	Funkčná spodná hranica súvislého korunového paliva
Hĺbka korunovej vrstvy	hlb_kor	spojitá	m	Zvislý rozsah korunovej vrstvy
Korunová pokryvnosť	pokryv_kor	spojitá	%	Plošné prekrytie územia korunami
Plošné množstvo korunového paliva	mnoz_kor	spojitá	kg·m ⁻²	Suchá hmotnosť dostupného jemného korunového paliva na jednotku pôdorysnej plochy
Objemová hustota korunového paliva	obj_hust_kor	spojitá	kg·m ⁻³	Suchá hmotnosť dostupného jemného korunového paliva na jednotku objemu korunovej vrstvy
Kontinuita korún	spojit_kor	kategória/ukazovateľ	kód alebo bezrozmerné	Horizontálne prepojenie korunovej vrstvy
Vlhkosť jemného paliva	vlhk_jem	spojitá, dynamická	%	Časovo premenlivá vlhkosť jemného odumretého povrchového paliva
Pôvod hodnoty	povod_udaja	kategória	kód	Spôsob vzniku hodnoty: meraná, odvodená, modelovaná alebo klasifikačne priradená
Dátová podpora	podpora_dat	kategória/ukazovateľ	kód alebo bezrozmerné	Úroveň priestorovej a dátovej podpory výslednej hodnoty
Neistota hodnoty	neistota	spojitá/kategória	podľa parametra alebo kód	Kvantitatívne alebo kvalitatívne vyjadrenie neistoty výslednej hodnoty

Vektorové vrstvy majú používať slovenské názvy polí bez diakritiky. Úplný význam sa vedie v dátovom slovníku. Pri JPRL sa odporúča minimálne zachovať identifikátor, výmeru, dátum platnosti, dominantnú palivovú triedu, podiel hlavných tried, priemerné alebo charakteristické kvantitatívne parametre, pôvod údajov a triedu neistoty.

Pre terénne plochy možno použiť napríklad polia:

- „id_plochy“ – jednoznačný identifikátor terénnej plochy;
- „id_lokality“ – jednoznačný identifikátor lokality alebo širšieho hodnoteného územia;
- „id_odberu“ – jednoznačný identifikátor odberového miesta alebo vzorky;
- „id_transektu“ – jednoznačný identifikátor transektu;
- „id_profilu“ – jednoznačný identifikátor vertikálneho profilu;
- „datum_mer“ – dátum merania;
- „cas_mer“ – čas merania;
- „typ_mer“ – druh vykonaného terénneho zisťovania;
- „presn_pol“ – odhad polohovej presnosti;
- „plocha_m2“ – podporná plocha merania;
- „typ_povrch“ – terénne určený typ povrchového paliva;
- „nositel_sir“ – dominantný nositeľ povrchového šírenia;
- „mnoz_jem“ – množstvo jemného odumretého povrchového paliva;
- „mnoz_byl“ – množstvo bylinného paliva;
- „mnoz_krov“ – množstvo krovínového paliva;
- „mnoz_drevo“ – množstvo ležiaceho dreva;
- „hlb_opad“ – hĺbka vrstvy opadu;
- „hlb_hrab“ – hĺbka vrstvy hrabanky;
- „hlb_lozko“ – hĺbka palivového lôžka;
- „obj_hust_pov“ – objemová hustota povrchového palivového lôžka;
- „pokryv_pov“ – pokryvnosť povrchových palivových zložiek;
- „spojit_pov“ – horizontálna kontinuita povrchového paliva;
- „rozklad“ – stupeň rozkladu ležiaceho dreva alebo organického paliva;
- „podiel_zive“ – podiel živého paliva;
- „podiel_odum“ – podiel odumretého paliva;
- „vlhk_jem“ – vlhkosť jemného odumretého povrchového paliva;
- „vlhk_zive“ – vlhkosť živého bylinného a krovínového paliva;
- „datum_pov“ – dátum platnosti alebo zisťovania parametrov povrchového paliva;
- „rozsah_rebr“ – výškový rozsah rebríkového paliva;
- „pocet_vrst“ – počet obsadených výškových pásiem rebríkového paliva;
- „medzera_vrst“ – najväčšia vertikálna medzera medzi funkčne významnými palivovými vrstvami;
- „spojit_zvis“ – vertikálna kontinuita palivových vrstiev;
- „tried_rebr“ – trieda rebríkového paliva;
- „vyska_rebr_d“ – dolná hranica výškového rozsahu rebríkového paliva;
- „vyska_rebr_h“ – horná hranica výškového rozsahu rebríkového paliva;
- „vyska_por“ – charakteristická výška porastu;
- „vyska_kor_b“ – funkčná výška korunovej bázy;
- „hlb_kor“ – hĺbka korunovej vrstvy;
- „pokryv_kor“ – korunová pokryvnosť;
- „mnoz_kor“ – plošné množstvo korunového paliva;

- „obj_hust_kor“ – objemová hustota korunového paliva;
- „spojit_kor“ – horizontálna kontinuita korun;
- „odum_kor“ – podiel odumretého jemného paliva v korunách;
- „vlhk_kor“ – vlhkosť jemného korunového paliva;
- „datum_kor“ – dátum platnosti alebo zisťovania parametrov korunového paliva;
- „povod_udaja“ – základná kategória pôvodu hodnoty, napríklad meraná, odvodená, modelovaná alebo klasifikačne priradená;
- „zdroj_udaja“ – konkrétny zdroj údajov, napríklad terénne meranie, Lidar, porastová databáza, družicový produkt alebo iný vstup;
- „metoda_odv“ – spôsob získania alebo odvodenia hodnoty, napríklad priame meranie, výpočet, alometrický vzťah, štatistický model alebo klasifikačné pravidlo;
- „verzia_met“ – verzia použitého metodického postupu, modelu alebo klasifikačného pravidla;
- „podpora_dat“ – údaj o dátovej alebo priestorovej podpore výslednej hodnoty;
- „neistota“ – kvantitatívne alebo kvalitatívne vyjadrenie neistoty hodnoty;
- „poznámka“ – odborná poznámka k mimoriadnym podmienkam, odchýlkam alebo okolnostiam merania.

Pre JPRL sa odporúča používať samostatné polia pre dominantnú triedu a plošný podiel jednotlivých významných tried. Takto možno zachovať heterogenitu bez vytvárania neprimerane veľkého počtu malých polygónových objektov.

Názov súboru alebo vrstvy má používateľovi umožniť identifikovať obsah bez otvorenia metadát. Odporúča sa používať stabilnú štruktúru pozostávajúcu z tematického kódu, územia, referenčného obdobia a verzie.

Príkladom môže byť názov ``mnoz_jem_SR_2026_v01``, ktorý označuje vrstvu množstva jemného paliva pre Slovenskú republiku, referenčný rok 2026 a prvú verziu. Pri dynamickej vrstve sa namiesto roku použije konkrétny dátum alebo dátum a hodina.

Verzia sa mení vtedy, keď sa zmení obsah alebo metodika. Oprava metadát bez zmeny priestorových hodnôt sa môže viesť ako menšia revízia dokumentácie. Pri zmene klasifikačných hraníc, modelu alebo významnej časti vstupných údajov sa vytvorí nová obsahová verzia.

Staršie verzie sa nemajú prepisovať. Archivácia umožňuje späťne zistiť, z akých údajov vychádzal konkrétny výpočet alebo rozhodnutie.

Každá finálna vrstva musí byť sprevádzaná metadátami minimálne v rozsahu potrebnom na jej odbornú interpretáciu a reprodukciu. Metadátový záznam má obsahovať názov vrstvy, účel, odbornú definíciu parametra, autora alebo správcu, zdrojové údaje, dátum vytvorenia, referenčné obdobie, súradnicový systém, priestorové rozlíšenie alebo mierku, použitú metódu, jednotku, rozsah platných hodnôt, spôsob kódovania chýbajúcich údajov, výsledky overenia a známe obmedzenia.

Pri modelovaných vrstvách sa uvedie aj verzia modelu, kalibračný a overovací súbor a základný ukazovateľ presnosti. Pri kategorizovaných vrstvách sa priloží číselník tried. Pri dynamických vrstvách sa uvedie presný čas platnosti a interval aktualizácie.

Metadáta sa nemajú vytvárať až po ukončení spracovania z pamäte spracovateľa. Majú sa generovať alebo priebežne dopĺňať počas celého pracovného postupu, pretože časť informácií o vstupných údajoch, vykonaných transformáciách, použitých modeloch a klasifikačných pravidlách sa neskôr nemusí dať spoľahlivo rekonštruovať. Pri každej vrstve sa musí evidovať aj kód parametra podľa dátového slovníka a pri modelovaných alebo klasifikačne odvodených vrstvách verzia použitého modelu alebo pravidla.

Symbolika je prezentačná vlastnosť a musí byť oddelená od analytickej hodnoty. Rovnaká vrstva môže mať rozdielnu symboliku podľa účelu mapy, bez zmeny samotných dát.

Pri kategóriových vrstvách sa používa stabilná legenda s jednoznačnými názvami a kódmi tried. Pri spojitých parametroch sa uvádza jednotka, rozsah hodnôt a spôsob rozdelenia hodnôt do zobrazovaných intervalov. Symbolika a hranice zobrazovaných intervalov sú prezentačnými vlastnosťami a nesmú meniť pôvodné analytické hodnoty.

Intervaly legendy nemajú byť volené iba automaticky podľa rozdelenia hodnôt v konkrétnom súbore. Ak sa mapy používajú na časové alebo priestorové porovnanie, hranice zobrazovaných tried sa nemajú určovať samostatne pre každý súbor iba automatickou klasifikáciou podľa aktuálneho rozdelenia hodnôt. Na porovnanie rokov, regiónov alebo scenárov sa používajú rovnaké alebo vopred definované hranice tried, aby rovnaká farba alebo symbol predstavovali porovnateľný interval hodnôt.

Grafická prezentácia nesmie zakrývať chýbajúce údaje ani neistotu. Plochy bez údajov sa zobrazujú samostatným symbolom a podľa účelu možno použiť aj vrstvu neistoty alebo dátovej podpory.

Jedna detailná vrstva nemusí byť vhodná na všetky mierky a účely použitia. Pre celoštátnu prezentáciu možno vytvoriť generalizovanú verziu, zatiaľ čo podrobné hodnotenie obce, lesného celku alebo zásahového úseku využíva pôvodnú analytickú podrobnosť, ak ju podporuje skutočné rozlíšenie vstupných údajov.

Generalizácia sa vykonáva podľa odborného významu parametra. Pri spojitých údajoch možno použiť vhodnú agregáčnú funkciu, pri kategóriách dominantnú triedu alebo plošné podiely jednotlivých tried a pri líniových prvkoch geometrické zjednodušenie s kontrolovanou toleranciou.

Generalizovaná vrstva je nový odvodený produkt. Musí mať vlastné metadáta a nesmie nahradiť pôvodnú detailnú vrstvu. Zvlášť pri palivovej heterogenite môže zovšeobecnenie zakryť menšie, ale významné súvislé palivové útvary.

Niektoré rastrové vrstvy sa pripravujú ako vstupy do modelov správania požiaru. Konkrétny súbor vstupných parametrov závisí od použitého modelovacieho systému. Ide najmä o palivový model povrchového paliva, množstvo paliva podľa požiadaviek použitého modelovacieho systému, vlhkosť paliva, výšku porastu, výšku korunovej bázy, korunovú pokryvnosť a objemovú hustotu korunového paliva. Podľa typu modelu môžu byť potrebné aj ďalšie parametre povrchového, rebríkového alebo korunového paliva.

Pred exportom do konkrétneho modelovacieho systému sa musí skontrolovať definícia požadovaného parametra, jednotka, kódovanie, súradnicový referenčný systém, veľkosť bunky a povolený rozsah hodnôt. Technické požiadavky konkrétneho modelu nesmú spätne meniť význam ani štruktúru pôvodnej palivovej databázy.

Ak model vyžaduje inú veľkosť bunky, formát alebo kódovanie, vytvorí sa samostatná exportná vrstva. Pôvodná analytická vrstva zostáva zachovaná. Tým sa zabráni opakovanému prevzorkovaniu alebo inej úprave zdrojových analytických údajov pre rôzne aplikácie.

Pri hodnotení rizika vzniku požiaru sa z palivovej databázy využívajú najmä vrstvy prítomnosti a množstva jemného iniciačne významného paliva, jeho horizontálnej kontinuity a aktuálnej vlhkosti. Rebríkové a korunové charakteristiky sa uplatňujú predovšetkým pri hodnotení možného ďalšieho rozvoja a správania požiaru po jeho vzniku.

Z tohto dôvodu sa nemá vytvárať jeden všeobecný raster „palivového rizika“, ktorý by bez rozlíšenia spájal iniciačné, povrchové a korunové charakteristiky. Takýto výstup by miešal rozdielne procesy a sťažoval odbornú interpretáciu.

Finálne vrstvy (tabuľka 8) sa majú vytvárať tak, aby bolo možné každú palivovú charakteristiku jednoznačne zaradiť k presne definovanej časti následného hodnotiaceho alebo modelovacieho rámca.

Rastrové a vektorové výstupy musia poskytovať vzájomne konzistentnú informáciu. Ak je napríklad pre JPRL uvedená dominantná palivová trieda, musí byť možné túto hodnotu znovu odvodiť z príslušného rastrového podkladu rovnakým pravidlom.

Vektorové agregácie sa preto nemajú ručne upravovať bez zaznamenania zmeny. Ak odborná kontrola vedie ku korekcii výslednej triedy alebo iného odvodeného atribútu, pôvodná hodnota sa neprepíše bez záznamu. Korekcia sa uloží ako samostatný atribút alebo ako nová verzia spolu s dôvodom, dátumom a identifikáciou použitého pravidla.

Pred publikovaním sa kontroluje zhodnosť počtu platných buniek, výmer, plošných podielov a agregovaných štatistík. Významnejšie rozdiely medzi rastrovým a vektorovým súhrnom musia byť vysvetlené napríklad rozdielom hraníc, výpočtom na čiastočných bunkách alebo generalizáciou.

Tabuľka 8 Odporúčaný súbor finálnych výstupov

Skupina	Rastrový výstup	Vektorový výstup	Hlavné využitie
Povrchové palivo	typ, množstvo, hĺbka, kontinuita	súhrn podľa JPRL	iniciácia a povrchové šírenie
Rebríkové palivo	trieda a vertikálne parametre	lokality s vysokou kontinuitou	prechod do korún
Korunové palivo	výška, báza, pokryvnosť, množstvo, objemová hustota	súhrn podľa JPRL	korunové správanie
Dynamický stav	vlhkosť podľa dátumu	referenčné merania	aktuálne nebezpečenstvo
Terénne údaje	spravidla sa nevytvára	body, línie a plochy	kalibrácia a overenie
Pôvod, dátová podpora a neistota	pôvod, neistota, dátová podpora	súhrnná kvalita jednotiek	interpretácia spoľahlivosti
Zmeny	voliteľný raster zmeny	ťažba, poškodenie, požiar	aktualizácia databázy

Finálne analytické vrstvy sa archivujú spolu s metadátami, číselníkmi, dátovým slovníkom, použitými klasifikačnými pravidlami a záznamom verzie pracovného postupu. Archivovaná verzia je nemenná. Ak sa zistí chyba, zmení metodika alebo sa získajú nové vstupné údaje, vytvorí sa nová verzia bez prepísania predchádzajúcej.

Na distribúciu sa môžu pripraviť zjednodušené alebo optimalizované súbory, webové mapové služby a prezentačné mapy. Distribučný produkt však musí obsahovať odkaz na verziu analytického zdroja, z ktorého vznikol.

Pri otvorení sprístupnení sa musí posúdiť licenčný režim vstupných údajov a prípadné obmedzenia vyplývajúce z citlivosti konkrétnych údajov. Odvodenie nového produktu samo osebe neznamená, že možno bez obmedzenia ďalej šíriť všetky zdrojové údaje.

Výsledná mapová vrstva sa chápe ako odborný dátový produkt, nie iba ako grafický obraz. Musí byť možné jednoznačne určiť význam každej hodnoty, jej kód podľa dátového slovníka, zdroj, spôsob odvodenia, priestorovú a časovú platnosť, dátovú podporu a neistotu a pri modelovaných alebo klasifikačne odvodených produktoch aj verziu použitého modelu alebo pravidla. Takto vytvorené rastrové a vektorové výstupy tvoria základ na následnú kontrolu a overenie, odbornú interpretáciu a využitie pri hodnotení lesného paliva, rizika vzniku požiaru a modelovaní správania požiaru.

2.10. Overenie, kontrola a interpretácia mapových výstupov

Overenie, kontrola a interpretácia mapových výstupov predstavujú záverečnú fázu metodického rámca mapovania lesného paliva. Ich cieľom nie je iba zistiť, či bola vrstva technicky vytvorená bez chýb, ale posúdiť, do akej miery zodpovedá skutočným palivovým podmienkam, kde je jej použitie spoľahlivé a akým spôsobom sa má výsledok odborne interpretovať. Mapový výstup môže byť geometricky správny a vizuálne presvedčivý, ale tematicky nepresný. Záverečné hodnotenie preto musí oddeliť technickú kontrolu, tematické overenie a odbornú interpretáciu.

Postup nadväzuje na nezávislé terénne overovacie údaje vytvorené podľa podkapitoly 2.7 a na analytické a finálne vrstvy pripravené podľa podkapitol 2.8 a 2.9. Základnou zásadou je, že kvalita mapy sa neposudzuje podľa zhody s údajmi použitými na jej vytvorenie. Na objektívne overenie sa používajú nezávislé referenčné údaje alebo priestorovo oddelené overovacie plochy, ktoré nevstupovali do kalibrácie príslušného modelu.

Spôsob overenia sa musí prispôbiť typu výstupu. Mapa kategórií palivových tried sa hodnotí inými ukazovateľmi než spojitá vrstva množstva paliva, výšky korunovej bázy alebo objemovej hustoty korunového paliva. Pri dynamických vrstvách vlhkosti je navyše potrebné overovať aj časovú zhodu. Jediný univerzálny ukazovateľ kvality preto nie je postačujúci.

Technická kontrola zisťuje, či výsledná vrstva spĺňa formálne a geometrické požiadavky. Zahŕňa kontrolu rozsahu územia, súradnicového systému, veľkosti a zarovnania rastrových buniek, úplnosti atribútov, platnosti kódov, chýbajúcich hodnôt a logických väzieb medzi parametrami.

Tematické overenie posudzuje zhodu mapového výsledku s nezávisle zisteným stavom v teréne alebo s iným referenčným údajom vyššej dôveryhodnosti. Odpovedá na otázku, či mapa správne určuje triedu alebo hodnotu palivového parametra.

Odborná interpretácia určuje, čo možno z overenej vrstvy odvodiť a čo už presahuje jej význam. Napríklad vrstva s vysokým množstvom paliva neznamená automaticky vysoké riziko vzniku požiaru, ak nezohľadňuje vlhkosť, iniciačné zdroje a ďalšie podmienky. Rovnako vysoká objemová hustota korunového paliva neznamená, že na danom mieste nevyhnutne vznikne korunový požiar; vyjadruje jednu z podmienok jeho možného udržania.

Uvedené tri fázy sa dopĺňajú, ale nemajú sa zamieňať. Technicky správny raster môže mať nízku tematickú presnosť a tematicky presná vrstva môže byť nesprávne interpretovaná pri použití mimo rozsahu, pre ktorý bola vytvorená.

Pred tematickým overením sa vykoná technická kontrola všetkých finálnych vrstiev. Rastrové vrstvy sa porovnávajú s referenčnou mriežkou a overí sa ich rozsah, veľkosť bunky, súradnicový referenčný systém, dátový typ, kód chýbajúcej hodnoty a počet platných buniek. Vektorové vrstvy sa kontrolujú z hľadiska geometrickej platnosti, topológie a atribútovej úplnosti.

Pri jednotlivých parametroch sa kontrolujú fyzikálne a biologicky prípustné intervaly. Množstvo paliva nesmie byť záporné, korunová pokryvnosť musí zostať v intervale 0 až 100 %, výška korunovej bázy nesmie presiahnuť výšku porastu a hĺbka korunovej vrstvy nesmie byť záporná.

Kontroluje sa aj vzájomná konzistencia jednotlivých vrstiev. Overuje sa napríklad, či označenie plochy bez významného povrchového paliva nie je v rozpore s vysokým množstvom povrchového paliva alebo či nulová korunová pokryvnosť nie je kombinovaná s kladným množstvom alebo objemovou hustotou korunového paliva.

Technická kontrola zahŕňa aj vizuálne preverenie mapy. Vyhľadávajú sa pásy po spájaní snímok, ostré hranice medzi spracovateľskými blokmi, opakujúce sa štvorcové vzory po prevzorkovaní, lokálne posuny voči referenčnej ortofotomape a iné priestorové artefakty.

Overovací súbor musí byť nezávislý od údajov použitých na vytvorenie mapy. Ak sa tie isté plochy použili na kalibráciu klasifikátora alebo regresného modelu, nemajú sa znovu započítavať ako nezávislé overenie.

Ak sa na hodnotenie predikčnej schopnosti modelu používa krížové overovanie (krížová verifikácia), musí rešpektovať priestorovú závislosť údajov. Náhodné rozdelenie blízko ležiacich plôch medzi kalibračný a overovací súbor môže viesť k nadhodnoteniu schopnosti modelu predikovať na nových územiach. Podľa cieľa hodnotenia sa preto používajú priestorové bloky, celé lokality alebo iné priestorovo oddelené skupiny (Roberts et al. 2017). Priestorovo blokované krížové overenie modelu však nenahrádza nezávislé hodnotenie tematickej presnosti finálneho mapového produktu, ak je takýto referenčný súbor dostupný.

Overovacie plochy musia reprezentovať celý rozsah mapovaných podmienok. Nestačí vysoký počet bodov v bežných palivových typoch, ak chýbajú mladiny, poškodené porasty, rúbaniská, porasty s hustým podrastom alebo vysokým množstvom ležiaceho dreva. Presnosť nemožno deklarovať pre triedu, ktorá nebola dostatočne zastúpená v nezávislom overovacom súbore. Pri každej triede alebo odbornej skupine sa preto spolu s ukazovateľom presnosti uvádza aj počet nezávislých referenčných jednotiek.

Pri dynamických produktoch sa musí referenčné meranie časovo zhodovať s mapovou hodnotou. Meranie vlhkosti paliva vykonané niekoľko dní po dátume mapy nemusí byť vhodným overovacím údajom, najmä pri jemnom odumretom palive.

Pri porovnaní mapovej a terénnej hodnoty musí byť zohľadnená plocha, ktorú jednotlivé údaje reprezentujú. Jedna malá terénna vzorka nemá byť bez ďalšieho porovnávaná s priemernou hodnotou veľkého polygónového objektu. Rovnako sa nemá automaticky predpokladať, že jediná desaťmetrová bunka reprezentuje celý terénny transekt.

Ak referenčná plocha presahuje niekoľko rastrových buniek, mapová hodnota sa odvodí z rovnakého priestoru ako terénne meranie. Je možné použiť priemer, medián, dominantnú triedu alebo iný ukazovateľ podľa typu parametra. Spôsob priestorového zosúladenia sa musí použiť jednotne pre celý overovací súbor.

Na okrajoch porastov a na heterogénnych plochách je vhodné zaznamenať, či referenčná plocha obsahuje viac palivových typov. Takéto lokality môžu byť dôležité na hodnotenie prechodových zón, ale nemajú sa bez rozlíšenia používať ako čisté referenčné vzorky jednej triedy.

Kategorizované vrstvy, napríklad typ povrchového paliva alebo trieda rebríkového paliva, sa hodnotia porovnaním mapovej triedy s nezávislou referenčnou triedou. Základným nástrojom je matica zámen, v ktorej sa eviduje počet prípadov jednotlivých kombinácií referenčnej a mapovej triedy (Congalton a Green, 2019; Stehman a Foody, 2019).

Matica zámen umožňuje posúdiť nielen celkovú zhodu, ale aj systematické zámeny medzi konkrétnymi palivovými triedami. Tento aspekt je pri lesnom palive dôležitý, pretože dve triedy môžu mať podobný vzhľad na optickej snímke, ale rozdielny význam pre správanie požiaru.

V tejto metodike tvoria riadky matice zámen referenčné triedy a stĺpce mapované triedy. Túto orientáciu je potrebné zachovať vo všetkých tabuľkách a výpočtoch. Súčty v príslušnom riadku alebo stĺpci matice vyjadrujú počet mapovaných a referenčných jednotiek. V metodike musí byť vždy uvedené, či referenčné triedy tvoria riadky alebo stĺpce, aby nedošlo k zamene ukazovateľov

Celkový podiel správne klasifikovaných overovacích jednotiek možno vyjadriť (34):

$$P_c = \frac{\sum n_{ii}}{N} \quad (34)$$

kde

P_c – celková presnosť klasifikácie

n_{ii} – počet správne zaradených jednotiek na hlavnej diagonále matice zámen

N – celkový počet overovacích jednotiek

Celková presnosť však nesmie byť jediným hodnotiacim ukazovateľom. Ak jedna trieda výrazne prevažuje, vysoká celková zhoda môže zakryť slabú presnosť menej početných, ale významných tried.

.

Pre každú triedu sa preto hodnotí aj presnosť z pohľadu používateľa mapy (35):

$$P_{u,i} = \frac{n_{ii}}{\sum_j n_{j,i}}$$

a presnosť z pohľadu úplnosti zachytenia referenčnej triedy (36):

$$P_{t,i} = \frac{n_{ii}}{\sum_j n_{i,j}} \quad (36)$$

kde

n_{ii} – predstavuje počet správne zaradených jednotiek i-tej triedy

Presnosť používateľa odpovedá na otázku, aký podiel plôch zobrazených v mape ako určitá trieda túto triedu skutočne predstavuje. Presnosť tvorcu vyjadruje, aký podiel skutočných referenčných plôch danej triedy bol mapou správne zachytený.

Pri palivových mapách je vhodné uvádzať tieto ukazovatele pre každú triedu, nie iba jednu súhrnnú hodnotu. Osobitnú pozornosť si vyžadujú triedy spojené s vysokou kontinuitou jemného paliva, rebríkovým palivom alebo výrazným nahromadením drevných zvyškov.

Zámena dvoch palivových tried nemá vždy rovnaký odborný význam. Zámena dvoch podobných tried opadu môže mať menší vplyv na výsledok než nesprávne zaradenie súvislého trávového paliva medzi plochy bez významného paliva.

Preto sa popri štatistickom súhrne odporúča vytvoriť odbornú analýzu typov chýb. Zaznamenáva sa, ktoré triedy sa najčastejšie zamieňajú, v akých porastových a stanovištných podmienkach a či zámena vedie k nadhodnoteniu alebo podhodnoteniu významu paliva.

Pri hierarchickej klasifikácii možno hodnotiť presnosť na viacerých úrovniach. Mapa môže napríklad správne rozlíšiť opadové palivo od krovínového, ale menej presne rozlišovať medzi listnatým a zmiešaným opadom. Takéto hodnotenie je informatívnejšie než jediný údaj pre najpodrobnejšiu triedu.

Pri veľmi malom počte overovacích plôch v určitej triede sa percentuálna presnosť nemá interpretovať ako stabilný odhad. Počet referenčných jednotiek sa musí uviesť spolu s výsledkom.

Ak bol overovací súbor vytvorený stratifikovaným výberom a jednotlivé palivové triedy boli zámerne vzorkované s rozdielnou intenzitou, podiel správne alebo nesprávne klasifikovaných referenčných jednotiek vypočítaný priamo z počtov v matici zámen nemusí zodpovedať plošnému zastúpeniu týchto tried v mape. Pri odhade plošnej presnosti sa preto zohľadňuje výberový dizajn a plošný podiel jednotlivých mapových tried. Takýto postup umožňuje odvodiť plošne reprezentatívne ukazovatele presnosti a ich intervaly spoľahlivosti (Olofsson et al., 2014).

Tento postup je významný najmä pri celoštátnom mapovaní, kde sa menej početné, ale odborné významné palivové triedy môžu v terénnom overovaní vzorkovať intenzívnejšie než ich skutočný plošný podiel.

Spolu s plošne korigovaným odhadom je vhodné uvádzať interval spoľahlivosti. Presnosť mapy sa tak neprezentuje ako jedno absolútne číslo, ale ako odhad s vyjadrenou štatistickou neistotou.

Spojité vrstvy sa overuje porovnaním mapovej predikcie s nezávislou terénnou alebo inventarizačnou hodnotou. Pre každú overovaciu jednotku sa vypočíta rozdiel medzi odhadovanou a referenčnou hodnotou.

Pri hodnotení je vhodné kombinovať niekoľko ukazovateľov, pretože každý opisuje inú vlastnosť chyby. Priemerná absolútna chyba vyjadruje typickú veľkosť odchýlky bez ohľadu na jej smer (37):

$$MAE = \frac{\sum d_i}{n} \quad (37)$$

kde

MAE – priemerná absolútna chyba,

d_i – absolútna hodnota rozdielu medzi mapovou a referenčnou hodnotou i -tej overovacej jednotky
 n – počet nezávislých overovacích jednotiek.

Odmocnina zo strednej kvadratickej chyby (RMSE) zvýrazňuje väčšie odchýlky a je vhodná na identifikáciu modelov, ktoré vytvárajú zriedkavé, ale výrazné chyby (38):

$$RMSE = \left(\frac{\sum (m_i - r_i)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (38)$$

Priemerné vychýlenie umožňuje zistiť systematický smer chyby (39):

$$B = \frac{\sum (m_i - r_i)}{n} \quad (39)$$

Pre i -tu overovaciu jednotku sa chyba definuje ako $e_i = \hat{y}_i - y_i$ (40), kde $\hat{y}_i$ je mapová alebo modelovaná hodnota a referenčná hodnota.

Kladná hodnota znamená pri uvedenom usporiadaní systematické nadhodnocovanie a záporná hodnota podhodnocovanie. Znamienkovú konvenciu treba uviesť v metodike.

Samotná korelácia medzi mapovou a referenčnou hodnotou nie je postačujúcim dôkazom správnosti. Dve množiny môžu byť silne korelované a súčasne sa systematicky líšiť v absolútnej úrovni. Preto sa musí hodnotiť aj veľkosť a smer odchýlok.

Číselné ukazovatele sa majú doplniť grafickou analýzou. Porovnanie mapových a referenčných hodnôt umožňuje identifikovať nelinearitu, systematické nadhodnocovanie nízkych hodnôt, podhodnocovanie extrémov alebo skupiny plôch s odlišným správaním. Pre každú nezávislú validačnú lokalitu sa porovná hodnota predikovaná mapovým modelom s referenčnou hodnotou zistenou terénnym meraním. Výsledky sa zobrazia v bodovom grafe, v ktorom os x predstavuje referenčné hodnoty a os y predikované hodnoty. Na kontrolu systematického charakteru chýb sa zároveň zostaví graf rezíduí voči predikovaným hodnotám.

Osobitne treba preveriť rezíduá vo vzťahu k predikovanej hodnote, drevinovému zložiu, veku porastu, nadmorskej výške a ďalším premenným. Ak sa chyba systematicky mení medzi určitými skupinami, jeden spoločný model nemusí byť vhodný pre celé územie.

Pri množstve paliva a ďalších kladne ohraničených parametroch treba overiť, či model nevytvára záporné alebo biologicky nereálne hodnoty. Takéto výsledky nemožno považovať iba za technický detail; signalizujú nevhodnú funkčnú formu alebo extrapoláciu.

Povrchové palivo patrí medzi najnáročnejšie zložky na priestorové overenie, pretože pod zapojenými korunami je jeho priame diaľkové pozorovanie obmedzené. Referenčné údaje preto musia vychádzať predovšetkým z nezávislých terénnych odberov a transektov.

Pri množstve povrchového paliva sa chyba hodnotí osobitne pre jemné odumreté palivo, bylinnú a krovinovú zložku a ležiace drevo podľa definovaných veľkostných tried. Spojenie všetkých zložiek do jednej celkovej hmotnosti môže zakryť nesprávne rozdelenie medzi jednotlivými komponentmi.

Pri hĺbke palivového lôžka sa kontroluje nielen priemerná chyba, ale aj to, či model systematicky podhodnocuje veľmi hlboké vrstvy po ťažbe alebo poškodení lesa. Pri horizontálnej kontinuite sa overuje schopnosť zachytiť súvislé cesty šírenia, nie iba priemernú pokrývnosť.

Mapová vrstva povrchového paliva sa má interpretovať ako odhad pre konkrétnu referenčnú sezónu alebo obdobie. Sezónne sa meniaci bylinná zložka môže zmeniť svoj význam bez toho, aby sa výrazne zmenila základná drevinová štruktúra porastu.

Pri rebríkovom palive sa overuje najmä správnosť identifikácie vertikálneho prepojenia medzi povrchom a korunovou vrstvou. Referenčný záznam musí zachytiť najmenej výškový rozsah rebríkového paliva, počet obsadených výškových pásiem, veľkosť vertikálnych medzier a funkčné prepojenie s korunovou vrstvou.

Ak je výsledok vytvorený z laserového skenovania, treba overiť, či zvolený výškový profil zachytáva vegetáciu v spodnej časti porastu. Husté koruny môžu znižovať počet laserových návratov zo spodných vrstiev a viesť k podhodnoteniu rebríkového paliva.

Pri kategorizovanej vrstve sa vyhodnotí matica zámen medzi terénnou a mapovou triedou vertikálnej kontinuity. Pri spojitých parametroch spodnej a hornej výšky vrstvy možno použiť MAE, RMSE a priemerné vychýlenie.

Najvyššiu odbornú pozornosť si vyžadujú chyby, pri ktorých mapa označí skutočne súvislé rebríkové palivo za nízku alebo nevýznamnú kontinuitu. Takáto chyba môže podhodnotiť podmienky pre vertikálny prenos horenia.

Korunové parametre sa overujú podľa ich fyzikálneho významu. Výška porastu sa porovnáva s nezávislým terénnym alebo podrobným lidarovým meraním. Korunová pokryvnosť sa overuje terénnym odhadom, podrobnými snímkami alebo nezávislým segmentovaným korunovým podkladom.

Výška korunovej bázy je metodicky citlivý parameter. Overenie musí používať rovnakú definíciu ako mapa. Ak mapa vyjadruje funkčnú bázu súvislej korunovej vrstvy, nemožno ju overovať iba meraním najnižšej živej vetvy jednotlivých stromov.

Plošné množstvo a objemová hustota korunového paliva sú spravidla modelované biometrické parametre. Ich overenie vyžaduje nezávislé inventarizačné alebo iné referenčné údaje umožňujúce odvodiť suchú hmotnosť dostupného jemného korunového paliva. Pri interpretácii výsledku sa musí zohľadniť aj neistota použitých alometrických vzťahov.

Pri objemovej hustote korunového paliva sa treba vyhnúť interpretácii jediného priemeru ako úplného opisu vertikálneho rozdelenia. Dva porasty môžu mať podobnú priemernú hodnotu, ale rozdielnu koncentráciu paliva v jednotlivých výškových vrstvách.

Dynamické vrstvy sa overujú súbežnými alebo časovo veľmi blízkymi terénnymi meraniami. Požadovaná časová zhoda závisí od dynamiky konkrétnej palivovej zložky; pri jemnom odumretom palive musí byť časová tolerancia výrazne prísnejšia než pri pomalšie reagujúcich palivových zložkách.

Pri hodnotení sa má zachovať informácia o meteorologických podmienkach pred meraním, najmä o zrážkach, relatívnej vlhkosti, teplote a oslnení. Výrazný lokálny dážď, ktorý nezachytil použitý meteorologický vstup, môže vysvetľovať miestnu odchýlku bez toho, aby išlo o všeobecnú chybu modelu.

Výsledok treba hodnotiť podľa typu paliva a sezóny. Chyba modelu môže byť malá počas stabilného suchého obdobia a výrazne vyššia počas rýchlych prechodov po zrážkach alebo pri fenologických zmenách živej vegetácie.

Presnosť nemá byť hodnotená iba ako jeden súhrnný údaj pre celé Slovensko. Chyby sa musia analyzovať aj priestorovo. Mapa rezíduí alebo nesprávne klasifikovaných overovacích plôch môže odhaliť regionálne zoskupenia chýb, ktoré globálna štatistika neukáže.

Priestorové zoskupenie chýb môže súvisieť s rozdielnym drevinovým zložením, geologickými a klimatickými podmienkami, kvalitou vstupných údajov, rozdielnym cyklom laserového snímania alebo nedostatočným terénnym zastúpením určitého regiónu.

Ak sa chyby výrazne koncentrujú v určitej oblasti, musí sa najskôr preveriť ich príčina, napríklad rozdielna kvalita vstupov, nedostatočné zastúpenie kalibračných plôch alebo regionálne odlišný vzťah medzi palivom a vysvetľujúcimi premennými. Až následne možno rozhodnúť o doplnení terénnych údajov, úprave modelu alebo vytvorení regionálne špecifického modelu.

Popri geografickom členení sa má presnosť hodnotiť aj podľa významných odborných skupín. Pri spojitých parametroch sa chyby môžu vyhodnocovať osobitne pre ihličnaté, listnaté a zmiešané porasty, mladiny a staršie porasty, otvorené a zapojené porasty alebo poškodené a nepoškodené plochy.

Takýto rozklad umožňuje zistiť, či model dosahuje dobrý celkový výsledok iba preto, že väčšina overovacích údajov pochádza z jednoduchšie mapovateľných podmienok. Ak je presnosť v porastoch s hustým podrastom výrazne nižšia, musí sa to uviesť ako obmedzenie použitia.

Výsledky sa nemajú rozdeľovať do príliš veľkého počtu skupín s malým počtom meraní. Pre každú uvádzanú čiastkovú presnosť je potrebné uviesť počet nezávislých overovacích jednotiek.

Neistota výslednej vrstvy je kombináciou viacerých zdrojov. Zahŕňa neistotu terénneho merania, polohovú chybu, nepresnosť vstupných priestorových údajov, časový nesúlad, modelovú chybu a neistotu vznikajúcu pri priestorovej agregácii alebo klasifikácii.

Vrstva neistoty sa preto nemá automaticky interpretovať ako pravdepodobnosť, že mapová hodnota je nesprávna. Je potrebné uviesť, čo konkrétny ukazovateľ vyjadruje. Môže ísť o štandardnú chybu predikcie, interval odhadu, pravdepodobnosť príslušnosti k triede alebo kvalitatívnu triedu dátovej podpory.

Pri spojitých parametroch možno podľa použitého modelu uvádzať interval spoľahlivosti odhadu alebo predikčný interval. Tieto intervaly majú rozdielny význam a nemajú sa zamieňať. Ak sa používa aproximácia založená na normálnom rozdelení, všeobecný tvar intervalu možno zapísať ako odhad $\pm$ príslušný kritický koeficient $\cdot$ štandardná chyba. Konkrétny koeficient a typ štandardnej chyby sa určujú podľa použitého modelu, cieľa intervalu a štatistických predpokladov.

Ak kvantitatívny interval nemožno spoľahlivo určiť, je vhodnejšie použiť transparentnú kvalitatívnu triedu než vytvoriť neodôvodnenú číselnú presnosť.

Pri interpretácii mapových výstupov je potrebné dôsledne rozlišovať priestorové rozlíšenie a presnosť. Rastrová bunka 10×10 m neznamena, že poloha hranice palivového typu alebo hodnota parametra je presná na 10 m.

Výstupná bunka určuje iba technické priestorové rozlíšenie dátového súboru. Skutočná informačná podrobnosť závisí od priestorového rozlíšenia a kvality vstupných údajov, hustoty terénnych meraní

a použitého modelu. Parameter odvodený napríklad z klimatického produktu s priestorovým rozlíšením 1 km zostáva informačne podstatne hrubší aj po jeho prevzorkovaní na mriežku 10 × 10 m..

Pri publikovaní a používaní výsledkov sa preto odporúča uvádzať nielen veľkosť bunky, ale aj dominantné pôvodné rozlíšenie vstupov a spôsob priestorového odvodenia. Tým sa predchádza nesprávnemu používaniu mapy na lokálne rozhodnutia, ktoré presahujú jej skutočnú podrobnosť.

Jednotlivá rastrová bunka predstavuje najmenšiu technickú jednotku výstupu, nie nevyhnutne samostatný ekologický objekt. Jej hodnota má byť interpretovaná v kontexte susedných buniek, palivovej vrstvy a pôvodu údajov.

Pri spojitých parametroch sa nemá preceňovať rozdiel medzi dvoma susednými bunkami, ak je menší než typická chyba odhadu. Pri spojitých parametroch sa nemajú preceňovať malé rozdiely medzi susednými bunkami, najmä ak sú porovnateľné s typickou neistotou alebo chybou predikcie príslušnej vrstvy.

Pri kategorizovaných mapách treba osobitne interpretovať izolované jednotlivé bunky odlišnej triedy. Môžu predstavovať reálny malý palivový objekt, ale aj klasifikačný šum. O ich zachovaní alebo generalizácii sa rozhoduje podľa minimálnej mapovacej jednotky a odborného významu.

Agregácia na JPRL uľahčuje využitie mapy v hospodárskej a preventívnej praxi, ale zároveň znižuje priestorovú podrobnosť. Porastová hodnota preto nemá nahradiť detailnú rastrovú vrstvu v úlohách, kde je dôležitá vnútorná heterogenita.

Pri spojitých parametroch sa odporúča uvádzať priemernú alebo mediánovú hodnotu spolu s mierou variability a podľa potreby s horným percentilom. Pri množstve paliva môže byť významná nielen priemerná hodnota, ale aj podiel plochy s vysokými hodnotami.

Pri kategorizovaných mapách sa uvádza dominantná trieda a plošný podiel ostatných tried. Ak dominantná trieda predstavuje iba mierne nadpolovičný podiel, jednotka sa má interpretovať ako heterogénna.

JPRL nie je automaticky homogénnou palivovou jednotkou. Jej hranice vznikli predovšetkým na účely hospodárskeho a priestorového členenia lesa.

Mapy paliva poskytujú jednu skupinu vstupov do hodnotenia rizika vzniku požiaru. Pri interpretácii je potrebné odlíšiť vlastnosti súvisiace s iniciáciou od vlastností ovplyvňujúcich následné správanie požiaru.

Pre iniciáciu sú významné najmä jemné odumreté palivo, jeho množstvo, kontinuita a aktuálna vlhkosť. Vysoká objemová hustota korunového paliva sama osebe nevypovedá o pravdepodobnosti vzniku požiaru na povrchu. Je významná až pri posudzovaní možnosti udržania aktívneho korunového šírenia po splnení podmienok pre prechod do korún.

Mapový výstup preto nemá byť interpretovaný tak, že plocha s najvyšším celkovým množstvom paliva je automaticky miestom s najvyšším rizikom vzniku požiaru. Hrubé ležiace drevo môže významne predlžovať horenie, ale pri iniciácii môže byť menej rozhodujúce než tenká súvislá vrstva veľmi suchého jemného paliva.

Pri hodnotení rizika vzniku požiaru sa musí palivová vrstva kombinovať s dynamickými meteorologickými podmienkami, iniciačnými faktormi a ďalšími relevantnými premennými podľa metodiky príslušnej kapitoly.

Pri použití mapových výstupov v modeli správania požiaru je potrebné kontrolovať, či význam, jednotky a rozsah vstupných parametrov zodpovedajú požiadavkám konkrétneho modelu. Opisná palivová trieda sa nesmie automaticky zamieňať s výpočtovým palivovým modelom.

Modelovaný výsledok dedí neistotu vstupných palivových vrstiev. Ak je napríklad výška korunovej bázy v určitej oblasti veľmi neistá, výsledok modelu pre prechod do korunového požiaru musí byť interpretovaný s rovnakou opatrnosťou.

Pri porovnávaní scenárov je vhodné používať rovnakú verziu palivových vrstiev a meniť iba parametre, ktorých vplyv sa skúma. Súčasná zmena paliva, vetra a vlhkosti môže sťažiť identifikáciu dôvodu rozdielu medzi scenármi.

Štatistické overenie nenahrádza odbornú vizuálnu kontrolu. Skúsený hodnotiteľ môže na podklade ortofotomáp, snímok, lesníckych údajov a terénnej znalosti identifikovať priestorové vzory, ktoré naznačujú chybu spracovania.

Vizuálne sa preverujú najmä hranice rúbanísk, mladiny, porastové medzery, plochy po poškodení, rozhrania lesa a nelesných pozemkov, líniové koridory a oblasti s náhlou zmenou hodnoty bez zjavnej príčiny.

Odborná kontrola však nesmie slúžiť na nezdokumentované ručné „vylepšovanie“ mapy. Každá korekcia musí mať uvedený dôvod, zdroj a dátum a musí byť reprodukovateľná. Ak sa zistí systematická chyba, vhodnejšie je opraviť klasifikačné pravidlo alebo model a vrstvu znovu vytvoriť než ručne meniť jednotlivé bunky.

Ku každej finálnej vrstve sa má vytvoriť stručný protokol overenia. Ten musí používateľovi umožniť zistiť, na akých údajoch bola kvalita posúdená a pre ktoré podmienky je výsledok dôveryhodný.

Protokol má obsahovať najmenej:

- názov a verziu mapovej vrstvy;
- kód hodnoteného parametra podľa dátového slovníka;
- referenčné obdobie vrstvy;
- dátum vytvorenia alebo aktualizácie vrstvy;
- použitú verziu modelu, algoritmu alebo klasifikačného pravidla, ak ide o modelovaný alebo klasifikačne odvodený výstup;
- typ overenia, t. j. nezávislé overenie finálnej mapovej vrstvy alebo krížové overenie modelu;
- počet a priestorové rozloženie overovacích plôch;
- spôsob výberu nezávislých údajov;
- definíciu referenčných tried alebo referenčných parametrov;
- spôsob priestorového zosúladenia mapových a referenčných údajov;
- spôsob časového zosúladenia mapových a referenčných údajov;
- priestorovú podporu referenčných meraní a spôsob jej porovnania s mapovou jednotkou;

- použité ukazovatele presnosti;
- pri kategorizovaných vrstvách orientáciu matice zámen;
- výsledky overenia celkovo aj podľa významných tried, palivových typov alebo iných odborných skupín;
- počet referenčných jednotiek použitých pri výpočte čiastkových ukazovateľov;
- opis priestorového rozdelenia chýb;
- identifikované systematické odchýlky;
- oblasti alebo situácie s nedostatočným overením;
- informáciu o extrapolácii alebo nízkej dátovej podpore, ak sa vyskytuje;
- hlavné obmedzenia použitia výslednej vrstvy;
- záver o použiteľnosti vrstvy – prijatá, prijatá s obmedzením alebo vrátená na revíziu;
- dátum vykonania overenia;
- identifikáciu osoby alebo pracoviska zodpovedného za overenie.

Tabuľka 9 Odporúčané ukazovatele podľa typu výstupu

Typ výstupu	Hlavné overenie	Odporúčané ukazovatele	Dôležitá interpretácia
palivová trieda	nezávislá terénna klasifikácia	matica zámen, celková presnosť, presnosť používateľa a tvorcu	zámeny medzi konkrétnymi triedami
množstvo paliva	nezávislé odbery	MAE, RMSE, vychýlenie	chyba podľa palivového typu a rozsahu hodnôt
hlbka palivového lôžka	terénne meranie	MAE, RMSE, vychýlenie	systematické podhodnotenie hlbokých vrstiev
rebríkové palivo	terénny vertikálny profil	matica zámen alebo MAE/RMSE	chyby pri súvislom vertikálnom prepojení
výška porastu	nezávislé výškové meranie	MAE, RMSE, vychýlenie	vplyv štruktúry a hustoty porastu
výška korunovej bázy	funkčne zhodné terénne meranie	MAE, RMSE, vychýlenie	zhodná definícia referenčnej bázy
korunová pokryvnosť	terén, snímka alebo nezávislé koruny	MAE, RMSE	nezamieňať s objemovou hustotou
plošné množstvo korunového paliva	nezávislé inventarizačné a alometrické údaje	MAE, RMSE, vychýlenie	zahrnúť alometrickú neistotu
objemová hustota korunového paliva	nezávislá porastová referencia	MAE, RMSE, vychýlenie	priemer nevystihuje celý vertikálny profil
vlhkosť paliva	časovo zhodné meranie	MAE, RMSE, vychýlenie	hodnotiť osobitne podľa paliva a sezóny

Na praktické použitie možno ku kvantitatívnym ukazovateľom vytvoriť aj zjednodušenú triedu výslednej dôveryhodnosti. Tá však nesmie nahradiť pôvodné ukazovatele presnosti. Jej úlohou je pomôcť používateľovi identifikovať oblasti, kde je výsledok podporený kvalitnými údajmi a lokálnym overením, a oblasti, kde je potrebná zvýšená opatrnosť.

Príklad základného členenia môže zahŕňať:

- trieda 1 – vysoká použiteľnosť: aktuálne a vhodné vstupy, dobré referenčné zastúpenie, prijateľná nezávislá presnosť a bez významnej extrapolácie;

- trieda 2 – podmienená použiteľnosť: primerané vstupy a overenie, ale vyššia neistota alebo nižšia hustota referenčných údajov;
- trieda 3 – obmedzená použiteľnosť: nízka lokálna dátová podpora, staršie alebo priestorovo hrubšie vstupy alebo významná extrapolácia;
- trieda 4 – neoverený výsledok: nedostatočné referenčné údaje alebo chýbajúce overenie pre požadovaný účel.

Hranice týchto tried musia byť určené podľa konkrétnych ukazovateľov kvality a nemajú sa používať ako subjektívne hodnotenie bez dokumentovaného pravidla.

Výsledok overenia má viesť k rozhodnutiu o ďalšom použití vrstvy. Mapový výstup možno prijať, prijať s obmedzením alebo vrátiť na revíziu.

Prijatie je vhodné vtedy, keď technické kontroly neodhalili závažnú chybu, nezávislé overenie poskytuje dostatočnú presnosť pre plánované použitie a neexistujú významné oblasti bez dátovej podpory.

Podmienené prijatie sa použije vtedy, keď je vrstva vhodná pre regionálne alebo orientačné použitie, ale nie pre podrobné lokálne rozhodovanie, alebo keď je kvalita dostatočná iba pre vybrané palivové typy a regióny.

Revízia je potrebná pri systematickom vychýlení, nízkej presnosti významných tried, výraznom priestorovom zoskupení chýb, chybných vstupoch alebo pri zistení, že model bol aplikovaný mimo rozsahu svojich kalibračných podmienok.

Tabuľka 10 Odporúčaný postup záverečného overenia

Krok	Činnosť	Výstup kontroly	Rozhodnutie
1	technická kontrola formátu, geometrie a atribútov	zoznam technických chýb	opraviť alebo pokračovať
2	kontrola logických vzťahov medzi vrstvami	zoznam nekonzistentných záznamov	opraviť alebo označiť
3	príprava nezávislého overovacieho súboru	referenčný súbor a jeho rozsah	posúdiť reprezentatívnosť
4	overenie kategorizovaných vrstiev	matica zámen a presnosť tried	identifikovať problematické triedy
5	overenie spojitých vrstiev	MAE, RMSE, vychýlenie a grafika chýb	identifikovať systematické odchýlky
6	priestorová analýza chýb	mapa rezíduí alebo zámen	určiť regionálne problémy
7	analýza podľa typov porastov a paliva	čiastkové presnosti	určiť rozsah platnosti
8	vyhodnotenie neistoty a dátovej podpory	vrstva dôveryhodnosti	určiť obmedzenia použitia
9	odborná vizuálna kontrola	zoznam podozrivých lokalít	potvrdiť alebo revidovať
10	záverečný protokol	verzia mapy a výsledky overenia	prijať, prijať s obmedzením alebo vrátiť na revíziu

Overenie mapového výstupu nie je jednorazovou administratívnou kontrolou vykonanou až po ukončení spracovania, ale súčasťou iteratívneho mapovacieho procesu. Zistené systematické chyby majú viesť k prevereniu vstupných údajov, doplneniu referenčných meraní, úprave klasifikačných pravidiel alebo modelov, prípadne k obmedzeniu rozsahu použitia výslednej vrstvy. Každá nová verzia musí byť opätovne technicky skontrolovaná a tematicky overená podľa rovnakých dokumentovaných zásad. Takýto postup umožňuje postupne zvyšovať odbornú spoľahlivosť mapovania lesného paliva bez vytvárania neodôvodneného dojmu úplnej alebo priestorovo rovnomernej presnosti.

2.11. Limity a neistoty pri mapovaní lesného paliva

Mapovanie lesného paliva je spojené s neistotou, ktorú nemožno úplne odstrániť ani pri použití podrobných terénnych údajov, kvalitných údajov DPZ a viac zdrojového geopriestorového spracovania. Dôvodom je samotná povaha palivového komplexu: jeho vlastnosti sa menia v priestore, v čase a medzi jednotlivými zložkami. Úlohou metodiky preto nie je vytvoriť mapu bez neistoty, ale identifikovať jej zdroje, obmedziť ich vplyv, zachovať ich v metadátach a zabrániť tomu, aby sa výsledok interpretoval s vyššou presnosťou, než akú podporujú vstupné údaje.

Limity mapovania možno rozdeliť na prirodzenú variabilitu paliva, obmedzenia terénneho zisťovania, priestorové a časové obmedzenia vstupných údajov, limity DPZ, neistotu modelového odvodenia, neistotu klasifikácie a neistotu vznikajúcu pri agregácii a prevode medzi rozdielnymi mierkami. Tieto zložky sa navzájom ovplyvňujú. Výsledná neistota preto nie je iba vlastnosťou jedného senzora alebo jedného modelu, ale dôsledkom celého spracovateľského reťazca.

Pri interpretácii je potrebné rozlišovať prirodzenú variabilitu palivového komplexu od neistoty vyplývajúcej z nedostatočného poznania alebo obmedzení použitých údajov a metód. Prirodzená variabilita predstavuje skutočné priestorové a časové rozdiely paliva, ktoré nemožno odstrániť presnejšími meraniami. Poznatková neistota vzniká v dôsledku obmedzeného počtu meraní, nedokonalnej pozorovateľnosti, polohovej chyby, neaktuálnosti údajov, modelových zjednodušení alebo klasifikačných pravidiel a možno ju znižovať doplnením údajov alebo zlepšením metodiky.

Najvýznamnejším základným limitom je vysoká priestorová heterogenita paliva. Aj v rámci jedného lesného porastu sa môžu výrazne meniť hrúbka opadu, množstvo hrabanky, zastúpenie trávy a krovín, množstvo ležiaceho dreva, výška spodných vetiev a hustota korunovej vrstvy. Priemerná hodnota preto nemusí vystihovať lokálne miesta s vysokým alebo naopak nízkym množstvom paliva.

Heterogenita môže byť náhodná alebo priestorovo usporiadaná. Vzniká vplyvom mikroreliefu, medzier v korunovej vrstve, okrajového efektu, rozdielnej intenzity opadu, lokálneho poškodenia stromov, vývrátov, hospodárskych zásahov a sukcesie. Z tohto dôvodu nemožno predpokladať, že každá JPRL je palivovo homogénna.

Prirodzená heterogenita sa osobitne prejavuje pri povrchovom palive. Malé odberové plochy môžu poskytovať veľmi rozdielne hodnoty aj vo vzdialenosti niekoľkých metrov. Zvyšovanie počtu opakovaní znižuje neistotu odhadu priemernej hodnoty, neodstraňuje však skutočnú variabilitu vnútri plochy.

Mapový výstup sa preto interpretuje ako reprezentácia charakteristickej hodnoty, triedy alebo distribúcie palivového parametra v určitej priestorovej jednotke, nie ako presný opis každej lokálnej palivovej situácie nachádzajúcej sa v jej vnútri.

Terénne zisťovanie poskytuje najpriamejšiu informáciu o palive, ale vždy pokrýva iba časť územia. Rozsah Slovenskej republiky, počet typov lesných porastov a vysoká variabilita podmienok znemožňujú merať všetky palivové kombinácie s rovnakou intenzitou.

Neistota vzniká už pri výbere plôch. Lokality dostupné z komunikácií môžu byť nadmerne zastúpené, zatiaľ čo strmé, odľahlé alebo poškodené porasty môžu zostať podhodnotené. Ďalším zdrojom neistoty je rozdielna priestorová podpora jednotlivých meraní. Jemné povrchové palivo môže byť zisťované na malej odberovej ploche, ležiace drevo na transekte, vertikálna štruktúra v profilových bodoch a korunové parametre na celej referenčnej ploche. Tieto merania reprezentujú rozdielne priestorové podpory a nemožno ich bez definovaného agregáčného alebo modelového postupu považovať za rovnocenné hodnoty jednej rastrovej bunky.

Ďalším zdrojom neistoty je rozdielna podporná plocha jednotlivých meraní. Hmotnosť opadu môže byť meraná na desatinách štvorcového metra, ležiace drevo na transekte a korunová štruktúra na ploche stoviek štvorcových metrov. Tieto hodnoty sa vzťahujú na rozdielnu priestorovú mierku a nemožno ich bez ďalšieho považovať za rovnocenné reprezentácie jednej rastrovej bunky.

Pri porovnávaní výsledkov medzi lokalitami sa musí zohľadniť aj použitá metodika. Rozdielny priemer odberovej plochy, odlišné hranice veľkostných tried, iný spôsob určenia suchého stavu alebo odlišné pravidlo zahrnutia hrubého dreva môžu vytvoriť metodický rozdiel, ktorý sa nesmie zameniť za skutočný rozdiel v palive.

Polohová neistota vzniká pri lokalizácii terénnych plôch aj pri geometrii priestorových vrstiev. V zapojenom lese môže byť presnosť satelitného určovania polohy znížená tienением korunami a viacnásobným odrazom signálu. Pri hraniciach porastov alebo v mozaikovitej vegetácii môže aj niekoľkometrová odchýlka viesť k priradeniu inej palivovej alebo porastovej charakteristiky.

Pri vzájomnom prepájaní terénnych a priestorových údajov sa kombinujú polohové neistoty jednotlivých zdrojov. Výsledná neistota vzájomného priradenia preto môže byť vyššia než polohová chyba ktoréhokoľvek z nich posudzovaného samostatne. Ak má terénna plocha vlastnú chybu polohy a zároveň hranica porastovej vrstvy pochádza z iného zdroja s ďalšou geometrickou nepresnosťou, skutočná neistota ich vzájomného priradenia je vyššia než chyba ktoréhokoľvek zdroja samostatne.

Pri lokálnych úlohách s vysokou priestorovou podrobnosťou preto nemožno pracovať iba s nominálnou veľkosťou rastového obrazového prvku. Potrebne je zohľadniť aj polohovú presnosť terénneho záznamu, ortofotomapy, lidarových dát a ďalších vrstiev.

Jedným z najvýznamnejších metodických rizík je zámena veľkosti pracovnej bunky so skutočným priestorovým rozlíšením informácie. Pre metodiku je navrhnutá spoločná pracovná mriežka 10 × 10 m, ktorá umožňuje technicky zosúladiť priestorové vrstvy a vykonávať operácie mapovej algebry.

Nie všetky vstupy však obsahujú informáciu na úrovni 10 m. Lesnícky atribút môže byť priemerom pre celý porast, klimatický údaj môže reprezentovať stovky metrov až kilometre a terénne meranie môže byť reprezentatívne iba pre inú podpornú plochu. Ich prevod na mriežku 10 × 10 m nemení pôvodnú informačnú podrobnosť.

Pri každej vrstve sa preto rozlišuje pôvodné priestorové rozlíšenie alebo podporná plocha zdroja, veľkosť pracovnej bunky a skutočná informačná podrobnosť výslednej hodnoty. Vhodná formulácia pri prevode

hrubšieho zdroja je: údaj bol prevedený na pracovnú mriežku 10 × 10 m; jeho skutočná informačná podrobnosť zostala zodpovedajúca pôvodnému zdroju.

Výstupná mriežka nesmie viesť k interpretácii, že hranica medzi dvoma triedami je známa s desaťmetrovou presnosťou. Najmä pri modelovaných povrchových parametroch môže byť skutočná priestorová podpora podstatne väčšia.

Rastrová bunka môže obsahovať viacero palivových zložiek alebo typov. Tento problém je významný na okrajoch porastov, pozdĺž ciest, na rúbaniskách, v mladinách, na rozhraní lesa a trvalého trávneho porastu a v priestoroch s mozaikovitou vegetáciou.

Priradenie dominantnej triedy zjednodušuje mapu, ale môže potlačiť menšinový komponent s významnou funkciou pri šírení požiaru. Napríklad úzky súvislý pás suchej trávy môže tvoriť cestu rýchleho šírenia aj v bunke, kde plošne prevažuje iný typ povrchu (paliva).

Pri zmiešaných bunkách je preto podľa účelu vhodné zachovať dominantnú triedu a plošné podiely hlavných palivových zložiek alebo tried. Ak sa eviduje aj sekundárna trieda, musí byť jednoznačne definované pravidlo jej určenia.

Palivová mapa má vždy časovú platnosť. Niektoré parametre, napríklad reliéf alebo základná pôdna charakteristika, sú relatívne stabilné, ale palivo sa môže výrazne meniť v priebehu mesiacov alebo rokov.

Najrýchlejšie sa mení vlhkosť jemného odumretého paliva a stav bylinnej vegetácie. Tieto vlastnosti nemožno reprezentovať jednou statickou vrstvou. Musia byť viazané na konkrétny dátum alebo obdobie a aktualizované z meteorologických alebo terénnych údajov.

Strednodobé zmeny vznikajú pri raste mladín, rozvoji krovinej vrstvy, odumieraní bylín, akumulácii opadu a rozklade dreva. Dlhodobejšie parametre korunovej štruktúry sa menia pomalšie, ale môžu sa náhle zmeniť po ťažbe, vetrovom poškodení, gradácii podkôrneho hmyzu, suchu alebo požari.

Pri každej vrstve preto musí byť uvedený dátum alebo obdobie, ktoré reprezentuje, a odporúčaný interval aktualizácie. Aktualizačný interval preto predstavuje vlastnosť konkrétneho parametra alebo vrstvy, nie celej geodatabázy ako jedného produktu.

Lesnícke údaje poskytujú základné informácie o drevinovom zložení, veku, výške, zakmenení a hospodárskom stave porastov, ale neboli pôvodne vytvorené ako databáza lesného paliva. Mnohé palivové vlastnosti preto obsahujú iba nepriamo.

Porastový údaj je spravidla súhrnnou charakteristikou celej jednotky. Nemusí zachytiť miestne zhľady ležiaceho dreva, husté zmladenie, medzery, kroviny alebo rozdiely vo vrstve opadu. Ak sa porastové údaje používajú na kvantitatívne alebo klasifikačné odvodenie palivových parametrov, musí byť vzťah ku konkrétnemu palivovému parametru preukázaný terénnymi alebo inými vhodnými referenčnými údajmi.

Ďalším limitom je časová aktualizácia. Evidovaný stav môže zaostávať za skutočnou zmenou po náhlej udalosti. Preto je vhodné kombinovať lesnícke databázy s informáciami o realizovaných zásahoch, poškodení porastu a aktuálnymi údajmi DPZ.

Optické družicové alebo letecké údaje poskytujú priestorovo súvislú informáciu o hornom povrchu vegetácie a jej spektrálnom stave. Ich význam pre mapovanie povrchového paliva v zapojenom lese je však obmedzený, pretože korunová vrstva zakrýva opad, hrabanku, jemné drevné palivo a časť podrastu.

Spektrálny signál nie je jednoznačnou funkciou množstva paliva. Môže byť ovplyvnený druhovým zložením, obsahom vody v listoch, pôdou, tieňom, fenológiou a geometriou osvetlenia. Rovnaká hodnota vegetačného indexu preto nemusí znamenať rovnakú palivovú situáciu.

Oblačnosť a tieň znižujú dostupnosť použiteľných pozorovaní. Pri časových kompozitoch sa môže výsledná hodnota skladať zo snímok z rozdielnych dní, čo treba zohľadniť pri dynamických parametroch.

Optické údaje sú preto vhodnejšie na stratifikáciu, rozpoznanie otvorených a poškodených plôch a sledovanie vegetačnej dynamiky než na priame určovanie všetkých komponentov množstva povrchového paliva.

Radarové snímanie poskytuje údaje nezávislejšie od oblačnosti a môže reagovať na štruktúru a obsah vody vo vegetácii. Radarový signál je však ovplyvnený vlnovou dĺžkou, polarizáciou, uhlom snímania, drsnosťou povrchu a geometriou porastu.

V členitom reliéfe vznikajú geometrické efekty a tieň, ktoré znižujú porovnateľnosť hodnôt medzi svahmi. Priame priradenie radarovej odozvy ku konkrétnej povrchovej palivovej zložke je preto neisté.

Radarové premenné sa majú používať ako doplnkové vysvetľujúce charakteristiky a ich vzťah ku konkrétnemu palivovému parametru musí byť samostatne preukázaný a overený pre príslušné podmienky.

Laserové skenovanie poskytuje informáciu o geometrickej a vertikálnej štruktúre vegetácie, nie priamo o suchej hmotnosti paliva. Plošné množstvo a objemová hustota korunového paliva sa preto odvodzujú prostredníctvom biometrických, alometrických alebo empirických modelových vzťahov. Neistota výsledku zahŕňa neistotu lidarových metrík, referenčných údajov aj použitého modelového vzťahu.

Výsledné metriky závisia od hustoty bodov, geometrie snímania, ročného obdobia a použitých pravidiel klasifikácie bodov. Dva lidarové zbory s rozdielnymi technickými parametrami nemusia poskytovať priamo porovnateľný počet návratov lúčov v jednotlivých výškových pásmach.

Pri veľmi nízkej vegetácii sa navyše zvyšuje riziko zámieny vegetačných bodov s bodmi terénu. To je významné pri mapovaní nízkych krovín a spodnej časti rebríkového paliva.

Bezpilotné letecké systémy umožňujú získať veľmi podrobné údaje na lokálnych plochách a sú vhodné na kalibráciu a overenie. Výsledky bezpilotného snímania sú preto vhodné najmä na lokálne podrobné mapovanie, doplnenie referenčných údajov a kontrolu vybraných priestorových vzorov; samy osebe nepredstavujú náhradu systematického terénneho zisťovania.

Fotogrametrické modely vytvorené zo snímok vyhotovených nad korunami stromov spravidla veľmi dobre zachytia hornú časť vegetácie, ale bez priameho pohľadu pod koruny neposkytujú úplnú informáciu o povrchovom a rebríkovom palive.

Množstvo korunovej biomasy sa často odvodzuje z priemeru stromu, výšky, dreviny alebo ďalších biometrických premenných pomocou alometrických rovníc. Takýto výpočet je modelový odhad a nemožno ho interpretovať ako priamo meranú hmotnosť.

Alometrický vzťah je platný iba v rozsahu drevín, veľkostí stromov a podmienok, pre ktoré bol vytvorený. Prenos rovnice do iného regiónu alebo na extrémne veľké či malé stromy môže viesť k systematickému skresleniu.

Neistota sa ďalej zvyšuje pri prevode celkovej korunovej biomasy na množstvo jemného paliva dostupného pre plameňové horenie. Tento podiel závisí od dreveniny, hrúbkového rozdelenia vetvičiek a stavu koruny.

Pri mapovaní plošného množstva paliva a objemovej hustoty korunového paliva sa preto musí zaznamenať použitý alometrický model a jeho rozsah platnosti. Ak pre domácu drevinu chýba vhodný vzťah, má byť neistota výsledku explicitne označená. Ak rovnaký alometrický vzťah vstupuje do kalibrácie aj do referenčného overenia výsledku, nejde o úplne nezávislý zdroj informácie a táto závislosť sa musí uviesť pri interpretácii neistoty.

Klasifikácia vždy zjednodušuje spojitú a heterogénnu realitu do obmedzeného počtu tried. Hranice medzi triedami sú preto do určitej miery metodickou konštrukciou.

Neistota vzniká najmä pri prechodových palivových komplexoch, kde žiadna trieda jednoznačne neprevahuje. Rovnaký porast môže v inom ročnom období zmeniť dominantný nositeľ šírenia, napríklad pri vyschnutí bylinnej vrstvy. Takáto sezónna zmena nemusí znamenať zmenu všetkých základných štruktúrnych parametrov palivového profilu; môže meniť najmä funkčnú interpretáciu dostupného paliva.

Ak sú hranice tried stanovené expertným rozhodnutím, musia byť transparentné a overiteľné. Ak sú odvodené štatisticky, ich stabilita sa musí posúdiť na nezávislých údajoch. Falošná presnosť vzniká vtedy, keď sa veľmi podobné hodnoty na dvoch stranách prahu interpretujú ako zásadne odlišné palivové situácie.

Pri výstupoch sa preto odporúča uchovávať pôvodné spojité parametre a triedu viesť ako odvodený atribút. To umožňuje zmeniť hranice klasifikácie bez straty pôvodnej informácie.

Štandardné palivové modely poskytujú jednotný rámec pre výpočty správania požiaru, ale boli vytvorené pre konkrétne palivové podmienky a matematické modely. Priame priradenie podľa názvu vegetácie alebo vizuálnej podobnosti môže byť nesprávne.

Porasty na Slovensku sa môžu od referenčných modelov líšiť množstvom paliva, hĺbkou vrstvy, podielom živého a odumretého paliva, spôsobom hospodárenia a sezónnou dynamikou. Priradenie slovenského palivového komplexu ku konkrétnemu štandardnému zahraničnému palivovému modelu sa preto musí chápať ako modelové priradenie, ktorého vhodnosť treba preveriť porovnaním relevantných palivových parametrov a podľa možnosti aj výsledkov modelovania s domácimi referenčnými údajmi.

Ak sa vytvárajú lokálne alebo národné palivové modely, ich parametre musia vychádzať z meraných domácich vlastností a výsledky musia byť porovnané so štandardnými modelmi. Cieľom nie je vytvoriť čo najväčší počet nových modelov, ale znížiť systematický nesúlad tam, kde existujúce modely nedostatočne reprezentujú domáce palivo.

Terénny model je vytvorený iba z podmienok zastúpených v kalibračnom súbore. Model je vytvorený z rozsahu podmienok zastúpených v kalibračnom súbore. Predikcia v rámci tohto rozsahu predstavuje použitie podporené kalibračnými údajmi, zatiaľ čo predikcia pre kombinácie vysvetľujúcich premenných mimo alebo na okraji kalibračného rozsahu predstavuje extrapoláciu alebo predikciu s obmedzenou dátovou podporou. Preto je potrebné vytvárať vrstvu dátovej podpory alebo podobnosti s kalibračnými podmienkami.

Extrapolácia je významným zdrojom neistoty. Model môže vytvoriť numericky platnú hodnotu aj v podmienkach, pre ktoré nemá terénnu oporu. Bez samostatnej kontroly môže takýto výsledok pôsobiť rovnako dôveryhodne ako hodnota v dobre zastúpenom kalibračnom priestore.

Preto je potrebné vytvárať vrstvu dátovej podpory alebo podobnosti s kalibračnými podmienkami. Oblasti mimo rozsahu terénnych údajov sa majú označiť ako nadmerne neisté a podľa možnosti ich je potrebné zaradiť medzi priority ďalšieho terénneho zberu.

Terénne plochy ležiace blízko seba majú často podobnejšie podmienky než vzdialené lokality. Ak sa susedné plochy náhodne rozdelia medzi kalibračný a overovací súbor, model môže dosiahnuť vysokú presnosť najmä preto, že overovacie údaje sú veľmi podobné údajom použitým pri jeho tvorbe.

Takýto výsledok nemusí zodpovedať schopnosti modelu preniesť sa do iného regiónu. Pri validácii sa preto odporúča používať priestorovo oddelené bloky alebo celé lokality, ako bolo uvedené v podkapitole 2.10.

Priestorová autokorelácia je prirodzenou vlastnosťou krajinných údajov, ale môže viesť k nadhodnoteniu predikčnej schopnosti modelu, ak sa ignoruje pri rozdelení kalibračných a overovacích údajov. Postup pri priestorovo oddelenom overovaní je uvedený v podkapitole 2.10. V tejto podkapitole sa priestorová autokorelácia chápe ako jeden zo zdrojov neistoty prenositeľnosti modelu.

Výsledná palivová vrstva môže byť odvodená z viacerých medzivýsledkov. Napríklad objemová hustota korunového paliva môže závisieť od odhadu výšky porastu, výšky korunovej bázy, biomasy koruny a priestorového objemu korunovej vrstvy. Každý vstup obsahuje vlastnú neistotu.

Pri odvodení výsledného parametra sa neistoty jednotlivých vstupov prenášajú podľa matematickej a štatistickej štruktúry použitého modelu. Nemožno preto predpokladať, že sa jednoducho sčítajú ani že sa automaticky vzájomne kompenzujú.

Kumulácia je osobitne významná pri zložených ukazovateľoch, ktoré kombinujú viacero palivových parametrov. Čím viac odvodených vrstiev vstupuje do jedného výsledku, tým dôležitejšie je zachovať oddelené vstupné vrstvy a nevnímať finálny index ako priamo meranú veličinu.

Ťažba, prerezávka, prebierka a ďalšie zásahy môžu palivový komplex meniť rýchlejšie, než sa aktualizujú základné databázy. Bezprostredne po zásahu môže klesnúť korunová kontinuita a súčasne výrazne vzrásť množstvo jemných a stredných zvyškov na povrchu.

Podobne po poškodení vetrom alebo snehom môže dôjsť k náhlemu zvýšeniu množstva ležiaceho dreva, zmene osvetlenia a následnému rozvoju bylinného a krovínového paliva. Jedna statická palivová trieda nemusí tento vývoj zachytiť.

Takáto udalosť má preto slúžiť ako spúšťač kontroly platnosti existujúcej palivovej vrstvy, nie automaticky ako dôvod na priradenie novej palivovej triedy bez ďalšieho overenia.

Vrstva udalostí a dátum poslednej kontroly preto patria k základným prvkom hodnotenia platnosti mapy. Plochy po významnej zmene majú byť označené na prednostnú aktualizáciu a nemajú sa bez kontroly interpretovať podľa staršieho palivového modelu.

Okraj lesa má často odlišnú mikroklimu, vegetačnú štruktúru a palivové podmienky než vnútro porastu. Vyššie oslnenie a prúdenie vzduchu môžu urýchľovať vysychanie povrchového paliva a podporovať rozvoj bylín a krovín.

Rozsah okrajového vplyvu nie je konštantný. Závisí od orientácie okraja, výšky porastu, susedného typu povrchu, reliéfu, veterných podmienok a času od vzniku novej porastovej steny. Pevný pás jednej šírky preto predstavuje iba zjednodušenie.

Pri lokálnom hodnotení je vhodné pracovať s menšími vzdialenosťami od porastovej steny a interpretovať ich ako pomocnú priestorovú charakteristiku, nie ako univerzálnu hranicu mikroklimatického efektu.

Národná palivová mapa je určená najmä na strategické hodnotenie, porovnanie regiónov, identifikáciu rozsiahlejších palivových vzorov a prípravu vstupov pre modelovanie vo väčšom územnom rozsahu.

Aj pri pracovnej bunke 10×10 m nemožno automaticky predpokladať, že národný produkt je dostatočný na rozhodnutie o konkrétnom zásahu v jednotlivom poraste, návrhu umiestnenia protipožiarneho pásu alebo posúdení malej lokality. Pre takéto úlohy je potrebné lokálne terénne overenie a podľa potreby podrobnejší zdroj údajov.

Použitie mimo pôvodného účelu je jedným z najčastejších spôsobov nesprávnej interpretácie mapy. Metadáta preto musia uvádzať odporúčaný priestorový rozsah, úroveň použitia a obmedzenia lokálnej interpretácie.

Podrobná farebná mapa môže pôsobiť presnejšie, než je jej skutočný informačný obsah. Jemná rastrová mriežka, plynulé farebné prechody a vysoké rozlíšenie zobrazovacieho zariadenia sú vlastnosti prezentácie, nie dôkaz presnosti údajov.

Symbolika by preto mala používateľovi umožniť rozlíšiť oblasti bez údajov a podľa potreby aj zóny nízkej dátovej podpory alebo zvýšenej neistoty. Veľmi jemné zobrazovacie intervaly môžu vytvárať falošný dojem rozdielov, ak je ich šírka menšia alebo porovnateľná s typickou neistotou príslušnej vrstvy.

Interpretácia musí vychádzať z hodnoty, jednotky, chyby a pôvodu, nie z vizuálnej ostrosti hranice na obrazovke.

Pri porovnávaní palivových máp z rozdielnych rokov musí byť zabezpečená metodická kompatibilita. Zdanlivá zmena môže vzniknúť nielen skutočnou zmenou porastu, ale aj zmenou senzora, hustoty laserových bodov, klasifikačného modelu alebo aktualizovanou definíciou palivovej triedy. Pri časovom porovnávaní sa preto musí evidovať verzia vstupných produktov, modelov, klasifikačných pravidiel a dátového slovníka. Ak sa metodika medzi obdobiami zmenila, musí sa pred interpretáciou trendu posúdiť, či sú vrstvy metodicky porovnateľné.

Časová analýza preto musí rozlišovať zmenu údajov a zmenu metodiky. Ak sa medzi dvoma verziami zmenil klasifikátor, je vhodné podľa možnosti prepočítať aj staršiu vrstvu novou metodikou alebo jasne označiť, že produkty nie sú úplne porovnateľné.

Rovnaká referenčná mriežka, stabilné názvy parametrov a verziovanie klasifikačných pravidiel sú základom dlhodobého sledovania.

Palivová geodatabáza obsahuje relatívne stabilné štruktúrne charakteristiky aj dynamické stavové premenné. Ich spojenie je potrebné pre hodnotenie aktuálnych podmienok, ale musí zostať časovo jednoznačné.

Statická vrstva typu paliva alebo korunovej štruktúry môže byť platná niekoľko rokov, zatiaľ čo vlhkosť jemného odumretého paliva sa môže výrazne zmeniť v priebehu hodín. Výpočet aktuálneho hodnotenia preto nesmie bez kontroly kombinovať dynamickú hodnotu s už neplatnou štruktúrnou vrstvou.

Pri každom výpočte má byť možné späťne určiť verziu statických vrstiev a čas dynamických vstupov. Tým sa zabezpečí reprodukovateľnosť aj pri neskoršej aktualizácii.

Zložené ukazovatele môžu zjednodušiť interpretáciu viacerých palivových parametrov, ale zároveň znižujú transparentnosť. Jedno výsledné číslo môže zakryť, či vysoká hodnota vznikla vysokou množstvom jemného paliva, vysokou korunovou hustotou alebo kombináciou viacerých stredných hodnôt.

Ak sa vytvára zložený index, musí byť možné rozložiť ho späť na jednotlivé vstupné parametre. Váhy a transformačné funkcie majú byť odborne zdôvodnené a citlivosť výsledku na ich zmenu má byť overená.

V tejto monografii preto zostáva základom oddelené mapovanie jednotlivých palivových charakteristík. Ich kombinácia patrí až do konkrétnej analytickej úlohy, v ktorej je presne definovaný význam výsledku.

Neistota má byť súčasťou mapového produktu, nie iba poznámkou v závere metodiky. Používateľ musí vedieť, kde sú výsledky dobre podložené a kde je potrebná zvýšená opatrnosť.

Pri významných vrstvách sa odporúča poskytovať minimálne údaj o pôvode hodnoty, dátume platnosti a triede alebo číselnom ukazovateli dôveryhodnosti. Pri modelovaných spojitých parametroch je vhodné doplniť chybu predikcie alebo interval neistoty, ak to použítý model umožňuje.

Komunikácia neistoty nemá viesť k odmietnutiu mapy ako nepoužiteľnej. Naopak, umožňuje primerane zhodnotiť kvalitu dostupných údajov a identifikovať územia, kde má ďalší terénny zber najvyššiu informačnú hodnotu.

Neistotu možno znižovať cielene. Najväčší prínos nemusí mať rovnomerné zahusťovanie terénnych plôch po celom území, ale dopĺňanie údajov v slabo zastúpených palivových typoch, regiónoch a podmienkach s vysokou modelovou neistotou.

Vrstva neistoty tak môže slúžiť aj ako plánovací nástroj terénneho zberu. Oblasti s vysokou neistotou, veľkým odborným významom a častými zmenami možno zaradiť medzi priority ďalšieho merania alebo podrobnejšieho snímania.

Po doplnení nových údajov sa model znovu kalibruje a nezávisle overí. Zníženie neistoty musí byť preukázané výsledkami overenia, nie iba vyšším počtom vstupných údajov.

Tabuľka 11 Súhrn hlavných zdrojov neistoty

Zdroj neistoty	Typický prejav	Dôsledok	Spôsob obmedzenia
prirodená heterogenita	veľké rozdiely vnútri porastu	lokálna hodnota sa líši od priemeru	viac opakovaní, opis variability
výber terénnych plôch	nedostatočné zastúpenie niektorých podmienok	výberové skreslenie modelu	stratifikovaný a priestorovo vyvážený zber

polohová chyba	nesprávne spojenie plochy a vrstvy	chybný kalibračný pár	presná lokalizácia a kontrola hraníc
rozdielna podporná plocha	meranie a raster reprezentujú inú mierku	neporovnateľné hodnoty	zosúladenie priestorovej podpory
časový nesúlad	porast sa medzi zbermi zmenil	falošný modelový vzťah	kontrola dátumov a udalostí
optické snímanie	prekrytie povrchu korunami	slabá pozorovateľnosť povrchového paliva	terénna kalibrácia a viac zdroje údajov
radarové snímanie	vplyv geometrie a vlhkosti	nejednoznačný vzťah k palivu	lokálna kalibrácia a kontrola reliéfu
laserové skenovanie	málo návratov zo spodných vrstiev	podhodnotenie rebríkového paliva	terénne overenie a vhodná hustota bodov
alometrické rovnice	modelovaná biomasa	neistota množstva korunového paliva a hustoty korún	domáce alebo overené rovnice
klasifikačné prahy	prechodové plochy	citlivosť na hranicu triedy	uchovanie spojitých hodnôt a overenie
modelová extrapolácia	kombinácie mimo kalibračného rozsahu	nepredvídateľná chyba	vrstva dátovej podpory a nové merania
prevzorkovanie	jemná bunka z hrubého vstupu	falošný dojem podrobnosti	uvádzať efektívne informačné rozlíšenie
zmena metodiky	rozdiel medzi verziami	zdanlivá časová zmena	verzovanie a spätný prepočet

Limity a neistoty neznamenajú, že mapovanie lesného paliva nemá praktickú hodnotu. Určujú hranice, v ktorých možno výsledok používať odborne správnym spôsobom. Kvalitná metodika sa nevyznačuje absenciou neistoty, ale tým, že ju dokáže identifikovať, kvantifikovať tam, kde je to možné, a transparentne komunikovať.

Pri národnom mapovaní je nevyhnutné akceptovať kompromis medzi priestorovým rozsahom, tematickou podrobnosťou a presnosťou. Celoštátna mapa nemôže nahradiť lokálny detailný prieskum, rovnako ako lokálne meranie nemožno bez modelového rámca preniesť na celé územie Slovenska.

Výstup sa preto musí vždy interpretovať spolu s údajom o zdroji, čase platnosti, pôvodnom rozlíšení, modelovej metóde a výsledkoch overenia. Pri pracovnej mriežke 10 × 10 m je osobitne dôležité zachovať informáciu o efektívnom informačnom rozlíšení vstupu.

Záverom metodického rámca je zásada, že neistota sa má prenášať spolu s informáciou, nie skrývať pri jej zjednodušení. Takto vytvorená geodatabáza umožňuje rozlíšiť to, čo bolo priamo zistené, čo bolo odvodené, kde je výsledok dobre overený a kde predstavuje iba kvalifikovaný odhad. Tento prístup vytvára predpoklad pre zodpovedné využitie mapových vrstiev v ďalších kapitolách monografie.

Neistota sa v navrhovanej metodike nepovažuje za jednu univerzálnu veličinu. Pri každom mapovom produkte sa podľa jeho charakteru rozlišuje najmenej pôvod hodnoty, dátová podpora, časová aktuálnosť, výsledok nezávislého overenia a prípadná modelová alebo klasifikačná neistota. Tieto informácie sa nemajú bez zdôvodnenia zlúčiť do jediného číselného ukazovateľa. Ak sa pre praktické použitie vytvorí súhrnná trieda použiteľnosti, pravidlo jej odvodenia musí byť explicitné, verziované a spätne reprodukovateľné.

Limity mapovania lesného paliva preto nemožno odstrániť iba zvýšením priestorového rozlíšenia alebo použitím technicky podrobnejších údajov. Spoľahlivosť výsledku závisí od reprezentatívnosti terénnych údajov, vhodnosti vstupných zdrojov, časovej zhody, správneho priestorového zosúladenia, rozsahu platnosti modelov a transparentného zachovania neistoty v celom spracovateľskom reťazci. Výsledná mapa má byť používaná iba v rozsahu, ktorý podporujú jej referenčné údaje, metadáta a výsledky overenia.

3. TERÉNNÉ ZISŤOVANIE A KVANTIFIKÁCIA POVRCHOVÉHO. REBRÍKOVÉHO A KORUNOVÉHO PALIVA

Mapovanie lesného paliva má zmysel iba vtedy, ak priestorová informácia zostáva fyzicky spätá s tým, čo sa v poraste skutočne nachádza. V slovenskej praxi je tento problém osobitne výrazný. Lesnícka evidencia poskytuje podrobný opis porastov a ich hospodárskeho stavu, no neobsahuje systematicky tie palivové vlastnosti, ktoré rozhodujú o iniciácii a šírení požiaru. DPZ zasa poskytuje súvislý priestorový obraz, ale povrch pod zapojenou korunou pozoruje iba nepriamo. Terénne zisťovanie preto nemožno chápať ako doplnkovú kontrolu hotovej mapy. V navrhovanom prístupe tvorí jej referenčný základ.

Metodika nadväzuje na skorší slovenský prístup k mapovaniu priestorovej distribúcie povrchového lesného paliva, v ktorom sa kombinovali terénne údaje, lesnícka typológia a geopriestorové spracovanie (Majlingová, Sedliak a Smreček, 2018). Nový metodický rámec však túto logiku rozširuje v troch smeroch. Po prvé, predmetom už nie je iba povrchová vrstva, ale celý vertikálny palivový profil od opadu a hrabanky cez bylinnú, krovinovú a rebríkovú vrstvu až po koruny. Po druhé, terénna jednotka je od začiatku naviazaná na pracovnú GIS mriežku 10 × 10 m a na JPRL. Po tretie, výsledkom terénneho zisťovania nie je jedna konečná palivová trieda, ale súbor fyzicky interpretovateľných parametrov, z ktorých možno palivový model odvodiť až následne.

Tento posun je dôležitý aj z hľadiska súčasného vývoja vo výskume lesných požiarov. Paneurópske klasifikačné prístupy už rozlišujú povrchové a korunové vrstvy a upozorňujú na potrebu viacúčelového mapovania paliva (Aragoneses et al., 2023). Novšie práce zároveň ukazujú, že samotný korunový objem nevystihuje vertikálnu dostupnosť paliva a že významným prvkom je práve rebríkové palivo a spojitosť vrstiev medzi povrchom a korunou (Viedma et al., 2024; Hakkenberg et al., 2024). V podmienkach Slovenska preto nie je vhodné prevziať iba hotovú zahraničnú palivovú triedu. Potrebne je najskôr zmerať a opísať domáci palivový komplex v štruktúre, ktorú možno neskôr prepojiť s rôznymi modelovacími systémami.

Základným pojmom tejto kapitoly je palivový profil priestorovej jednotky. Predstavuje súbor parametrov, ktoré opisujú množstvo, zloženie, horizontálnu a vertikálnu spojitosť a aktuálny stav paliva v konkrétnej priestorovej jednotke. Palivový profil je nadradený priradeniu štandardného palivového modelu. Znamená to, že terénny záznam zostáva použiteľný aj vtedy, keď sa neskôr zmení modelovací nástroj, klasifikačný systém alebo hranice palivových tried.

Metodika je koncipovaná pre podmienky slovenských lesov a využíva údaje, ktoré sú v domacom lesníckom prostredí prirodzene dostupné: hospodárske súbory lesných typov a súbory lesných typov, JPRL, drevinové zloženie, vek a štruktúru porastu, údaje o hospodárskych zásahoch a poškodení lesa. Tieto informácie sa nekonvertujú na palivo automaticky. Slúžia ako stratifikačný a interpretačný rámec, v ktorom sa terénne meranie spája s GIS a DPZ.

3.1. Koncepcia palivového profilu priestorovej jednotky

Pri tradičnom mapovaní paliva sa často postupuje tak, že sa porastu alebo obrazovému prvku priradí jedna kategória a tá sa ďalej používa ako zástupná informácia o jeho palivových vlastnostiach. Takýto postup je praktický, ale pri lesnom poraste stráca podstatnú časť informácie. Dva porasty zaradené do rovnakej povrchovej triedy môžu mať rovnaké množstvo opadu, no úplne rozdielnu krovinovú vrstvu,

výšku korunovej bázy alebo množstvo suchých vetiev. Z pohľadu rozvoja požiaru nejde o rovnakú situáciu.

V navrhovanej metodike sa preto každej referenčnej priestorovej jednotke priraduje palivový profil. Jeho jadro tvoria tri skupiny parametrov: povrchový profil, vertikálny profil a korunový profil. Povrchový profil opisuje nositeľa šírenia, množstvo jemného a hrubšieho paliva, hĺbku palivového lôžka, pokryvnosť a horizontálnu spojitosť. Vertikálny profil opisuje zmladenie, kroviny, suché vetvy a ďalšie zložky schopné sprostredkovať prenos horenia smerom ku korunám. Korunový profil opisuje výšku porastu, výšku korunovej bázy, hĺbku korún, korunovú pokryvnosť a podľa dostupnosti aj plošné množstvo a objemovú hustotu korunového paliva.

Palivový profil zámerne oddeľuje štruktúrne a stavové vlastnosti. Výška porastu, množstvo ležiaceho dreva alebo vertikálna kontinuita sa menia spravidla pomalšie. Vlhkosť jemného odumretého paliva sa môže zmeniť v priebehu hodín. Ak by boli oba typy údajov spojené do jednej nemennej triedy, mapa by rýchlo zastarávala. Štruktúrny profil preto zostáva stabilnou časťou geodatabázy a dynamické premenné sa k nemu pripájajú podľa dátumu a času.

Z praktického hľadiska je dôležitá ešte jedna vlastnosť: každá hodnota v palivovom profile má atribút pôvodu. Terénne zistená hĺbka opadu je meraná hodnota. Hĺbka korunovej vrstvy vypočítaná z výšky porastu a korunovej bázy je odvodená hodnota. Objemová hustota korún získaná alometrickým modelom je modelovaná hodnota. Tieto tri typy údajov sa v databáze nesmú zamieňať.

Povinné skupiny parametrov navrhovaného palivového profilu sumarizuje tabuľka 12.

Tabuľka 12 Základná štruktúra palivového profilu priestorovej jednotky

Časť profilu	Povinné parametre	Doplňujúce parametre	Primárny význam
povrchové palivo	typ povrchového paliva; nositeľ šírenia; množstvo jemného paliva; hĺbka palivového lôžka; horizontálna spojitosť	množstvo bylinného, krovinného a drevného paliva; stupeň rozkladu; podiel živého a odumretého paliva	iniciácia a šírenie povrchového požiaru
rebríkové palivo	trieda rebríkového paliva; výškový rozsah; vertikálna spojitosť	počet vrstiev; najväčšia medzera; pokryvnosť zmladenia a krovín	prechod z povrchového do korunového horenia
korunové palivo	výška porastu; výška korunovej bázy; hĺbka koruny; korunová pokryvnosť	Plošné množstvo paliva v korunách; objemová hustota korún; podiel odumretého korunového paliva	potenciál a šírenie korunového požiaru
stav paliva	vlhkosť jemného odumretého paliva; dátum a čas	vlhkosť živého bylinného, krovinného a korunového paliva	aktuálna dostupnosť paliva pre horenie
kvalita údajov	zdroj; dátum; neistota	metóda odvodenia; verzia modelu	sledovateľnosť a aktualizácia

3.2. Priestorový dizajn terénneho zisťovania

Priestorový dizajn musí riešiť dva protichodné problémy. Meranie jemného povrchového paliva vyžaduje malú plochu, aby bolo možné materiál odobrať a laboratórne spracovať. Porastová a korunová štruktúra naopak vyžaduje väčšiu plochu, pretože jednotlivý strom alebo jeden meter štvorcový nemôžu reprezentovať celý porast. Navrhovaná metodika preto používa vnorené meracie jednotky.

Základom je referenčná plocha 20×20 m. Je dostatočne veľká na zachytenie lokálnej porastovej štruktúry a zároveň ju možno priamo rozdeliť na štyri bunky 10×10 m, ktoré korešpondujú s pracovnou GIS mriežkou navrhnutou v kapitole 2. Tým sa vytvára prirodzená väzba medzi terénnym pozorovaním a výslednou rastrovou vrstvou. Zároveň sa zachová informácia o tom, že odberový rámec s plochou $0,25 \text{ m}^2$ nereprezentuje automaticky celú desaťmetroú bunku.

V rámci hlavnej plochy sa používajú tri typy vnorených jednotiek. Jemné povrchové palivo sa zisťuje na piatich odberových plochách s veľkosťou $0,5 \times 0,5$ m. Rebríkové palivo sa hodnotí na piatich vertikálnych profiloch. Ležiace drevo sa zaznamenáva na dvoch navzájom kolmých tranzektoch vedených cez stred plochy. Porastové a korunové parametre sa zisťujú pre celú hlavnú plochu.

Takéto usporiadanie nie je samoúčelné. Je navrhnuté tak, aby poskytovalo viac informácie o variabilite vo vnútri plochy bez neúmerneho zvýšenia terénnej náročnosti. Päť rámcov zachytí rozdiel medzi centrom plochy a štyrmi pracovnými bunkami, dva tranzekty znižujú závislosť od jedného smeru a profilové body umožnia odlíšiť súvislú rebríkovú vrstvu od lokálneho zhľuku zmladenia.

Hierarchiu terénnych jednotiek a ich funkciu sumarizuje tabuľka 13.

Tabuľka 13 Viacúrovňový návrh terénneho zisťovania lesného paliva

Úroveň	Navrhovaná jednotka	Počet	Hlavný účel
referenčná plocha	20×20 m	1	porastová a korunová štruktúra; spoločný priestorový rámec
pracovná GIS bunka	10×10 m	4	väzba terénnych údajov na rastrové mapovanie
odberový rámec	$0,5 \times 0,5$ m	5	množstvo, hĺbka a zloženie jemného povrchového paliva
vertikálny profil	bodový profil	5	rebríkové palivo a spojitosť výškových vrstiev
transekt ležiaceho dreva	20 m	2	hrubšie ležiace drevo, veľkostná štruktúra a rozklad

3.3. Výber lokalít pre podmienky Slovenska

Reprezentatívnosť terénneho súboru sa v tejto metodike neodvodzuje od administratívne rovnomerného rozmiestnenia plôch. Slovenské lesy sú príliš rozdielne v drevinovom zložení, stanovištných podmienkach, nadmorskej výške, hospodárskom režime a disturbanciách na to, aby rovnaký počet plôch v každom kraji predstavoval optimálny návrh.

Navrhuje sa viacstupňová stratifikácia. Prvú úroveň tvoria HSLT/SLT, pretože zachytávajú ekologický rámec stanovišťa, ktorý ovplyvňuje produkciu, rozklad a sezónnu dostupnosť biomasy. Druhú úroveň tvoria porastové charakteristiky: dominantná drevina alebo zmes drevín, vývojové štádium, zakmenenie a vertikálna štruktúra. Tretiu úroveň tvoria palivovo významné stavy, ktoré lesnícka typológia sama nevystihuje - presvetlenie porastu, silný rozvoj bylín alebo krovín, vysoký podiel odumretého dreva, po ťažbové zvyšky, poškodenie vetrom, suchom alebo biotickými činiteľmi.

Štvrtú úroveň tvorí priestorová informácia z DPZ. Predbežné lidarové metriky, výška porastu, korunová pokrývnosť a spektrálne charakteristiky sa používajú na identifikáciu vnútorného rozsahu variability. Terénny zber sa potom nesústreďí iba na typické priemerné plochy, ale zámerne zahŕňa aj okrajové kombinácie, v ktorých je modelová neistota pravdepodobne vyššia.

Takto chápaná stratifikácia je priamo aplikovateľná v slovenskom systéme hospodárskej úpravy lesov. JPRL poskytuje organizačný rámec zisťovania, samotná hranica JPRL sa však nepovažuje za hranicu homogénneho paliva. Základné rozmiestnenie referenčných plôch sa navrhuje formou pravidelnej priestorovej siete, ktorá zabezpečuje systematické pokrytie hodnoteného územia a obmedzuje subjektívnosť výberu lokalít. Ak je JPRL z hľadiska palivových charakteristík heterogénna, referenčné plochy musia zachytiť aj jej odlišné vnútorné palivové stavy. Po predbežnom vyhodnotení zastúpenia jednotlivých palivových modelov alebo palivových typov sa pravidelná sieť môže cielene zahustiť v kategóriách s nedostatočným počtom referenčných plôch tak, aby bol pre ich charakterizáciu, porovnávanie a následné štatistické vyhodnotenie k dispozícii dostatočný počet pozorovaní. Zahusťovanie siete sa pritom dokumentuje ako samostatná fáza výberu a doplnkové plochy sa v databáze označia tak, aby bolo možné pri ďalšom spracovaní odlíšiť základnú systematickú sieť od cielene doplneného výberu.

Samostatnou kategóriou sú prechodové a okrajové situácie. Okraje lesa, mladiny pri starších porastoch, rúbaniská, pásy pozdĺž komunikácií a plochy pod elektrickými vedeniami môžu vytvárať významne odlišné palivové podmienky. V národnom mapovaní nemajú byť automaticky zahrnuté do charakteristiky vnútorného porastu, ale hodnotené ako osobitná stratifikačná situácia.

3.4. Zisťovanie povrchového paliva

Povrchová vrstva je z hľadiska terénneho zisťovania najnáročnejšou časťou palivového profilu. Je veľmi heterogénna, rýchlo reaguje na hospodársky zásah a pod zapojenou korunou je iba slabo pozorovateľná z diaľky. Základom metodiky je preto priame zisťovanie zloženia, hĺbky, pokrývnosti, množstva a horizontálnej spojitosti.

V každom odberovom rámci sa najskôr vykoná nedeštruktívny opis. Zaznamená sa dominantný nositeľ šírenia, pokrývnosť listového a ihličnatého opadu, suchej a živej bylinnej vrstvy, machov, krovín, jemných drevných častíc, odkrytej minerálnej pôdy a prípadne ďalšej lokálne významnej zložky. Pokrývnosť sa vzťahuje na pôdorysnú plochu rámca; pri vertikálne sa prekrývajúcich vrstvách sa hodnotí každá vrstva samostatne.

Hĺbka opadu a hrabanky sa meria v piatich bodoch rámca - v strede a pri štyroch rohoch. Tento jednoduchý postup zachytí vnútornú variabilitu bez toho, aby sa priemerná hĺbka odvodila z jediného bodu. Hranica medzi čerstvým opadom a rozkladovou vrstvou sa určuje podľa zachovania pôvodnej

štruktúry rastlinného materiálu. Ak je hranica nejednoznačná, použije sa rovnaké rozhodovacie pravidlo pre celý zber.

Po nedeštruktívnom opise sa vykoná odber zložiek určených na kvantifikáciu suchej hmotnosti. Čerstvý opad, jemné odumreté drevné palivo, bylinná a podľa potreby krovinná zložka sa zbierajú oddelene. Hrabanka sa odoberá osobitne, pretože jej schopnosť plameňového horenia a tlenia sa líši od čerstvého opadu.

Výsledok jedného rámca sa neinterpretuje ako hodnota celej 10×10 m bunky. Reprezentatívnosť vzniká kombináciou piatich rámcov, opisom horizontálnej spojitosti a porovnaním s vizuálnym stavom celej bunky. Ak je variabilita medzi rámcami mimoriadne vysoká, bunka sa označí vyššou neistotou alebo sa doplní ďalší odber.

3.5. Horizontálna spojitosť a dominantný nositeľ šírenia

Samotné množstvo paliva nevysvetľuje, či sa požiar môže po povrchu šíriť súvisle. Rovnaké množstvo suchej trávy rozptýlené v izolovaných trsoch a súvislý trávny pás predstavujú rozdielnú situáciu. Preto sa v navrhovanej metodike horizontálna spojitosť vedie ako samostatný parameter.

V každej bunke 10×10 m sa určí dominantný nositeľ šírenia. Ide o palivovú zložku, ktorá pri suchých podmienkach vytvára najpravdepodobnejšiu súvislú cestu povrchového horenia. V listnatom poraste to môže byť súvislý listový opad, v ihličnatom poraste ihličie a jemné vetvičky, na presvetlenej ploche suchá tráva a v mladine kombinácia suchej bylinnej a krovinej vrstvy.

Spojitosť sa hodnotí v piatich triedach od nesúvislého paliva s veľkými nepalivovými medzerami po prakticky súvislý nositeľ šírenia. Pritom sa nesleduje iba percento pokryvnosti. Hodnotí sa aj veľkosť a orientácia medzier. Úzky neprerušovaný pás paliva môže byť z hľadiska šírenia významnejší než vyššia priemerná pokryvnosť rozdelená do izolovaných ostrovov.

Pre mapovanie je vhodné zachovať dve informácie: číselnú alebo triednu spojitosť a kód dominantného nositeľa. Až ich kombinácia umožňuje rozlíšiť, či vysoká spojitosť pochádza z opadu, trávy, krovín alebo iného paliva.

3.6. Kvantifikácia množstva povrchového paliva a veľkostných frakcií

Množstvo paliva sa vyjadruje ako suchá hmotnosť príslušnej zložky na jednotku horizontálnej plochy. Z hľadiska opakovateľnosti je dôležité, aby sa hmotnosť vždy viazala na presne definovanú plochu odberu a na rovnakú definíciu palivovej frakcie.

Základný výpočet pre výpočet množstva paliva má tvar (41):

$$w = \frac{m_s}{A} \quad (41)$$

kde

w – množstvo paliva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

m_s – suchá hmotnosť odobratej zložky (kg)

A – plocha odberového rámca (m^2)

Pre praktický prepočet platí (42):

$$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} = 10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \quad (42)$$

Odumreté drevné palivo sa triedi podľa priemeru. Pre kompatibilitu s modelmi založenými na Rothermelovom prístupe sa odporúča evidovať 1-hodinové palivo do 0,6 cm, 10-hodinové nad 0,6 do 2,5 cm, 100-hodinové nad 2,5 do 7,6 cm a 1 000-hodinové nad 7,6 cm. Časová trieda je modelovým označením rýchlosti vlhkostnej odozvy, nie priamo meraným časom vysychania.

Pri jemných frakciách sa uprednostňuje plošný odber. Pri hrubšom ležiacom dreve je vhodnejší líniový priesečníkový transekt, ktorý vychádza z etablovaných inventarizačných princípov (Brown, 1974). V navrhovanom dizajne sa používajú dva kolmé transekty, aby výsledok menej závisel od smerovej orientácie ležiaceho dreva.

Pri každom kuse pretínajúcom transekt sa zaznamená priemer v mieste prieniku a stupeň rozkladu. Podľa možností sa určí drevina. Prepočet objemu na suchú hmotnosť sa vykonáva pomocou hustoty zodpovedajúcej drevine a rozkladovej triede. Ak sa použije náhradná hustota, táto skutočnosť sa zaznamená ako zdroj neistoty.

Celkové množstvo povrchového paliva je až sekundárnym súčtom jednotlivých komponentov. V databáze sa musia zachovať samostatné množstvá jemného odumretého paliva, bylín, krovín a ležiaceho dreva. Tieto zložky sa pri požiari nesprávajú rovnako a ich spojenie do jedného čísla by znižovalo využiteľnosť údajov.

Navrhované členenie povrchových zložiek uvádza tabuľka 14.

Tabuľka 14 Zložky povrchového paliva a odporúčaný spôsob ich zisťovania

Zložka	Zisťovaný parameter	Metóda	Výstup
opad	pokryvnosť, hĺbka, suchá hmotnosť	odberový rámec	%, cm, kg·m ⁻²
hrabanka	hĺbka, suchá hmotnosť, stupeň rozkladu	odberový rámec	cm, kg·m ⁻² , trieda
bylinné palivo	pokryvnosť, výška, živý/odumretý podiel, množstvo paliva	rámec + opis bunky	%, cm, kg·m ⁻²
krovinové palivo	pokryvnosť, výška, množstvo paliva podľa potreby	opis bunky + výberový odber	%, m, kg·m ⁻²
jemné drevné palivo	priemerová trieda, množstvo paliva	plošný odber	kg·m ⁻²
hrubšie ležiace drevo	priemer, rozklad, druh podľa možnosti	2 kolmé transekty	objem/množstvo paliva podľa výpočtu

3.7. Rebríkové palivo ako samostatná vrstva

Rebríkové palivo je v navrhovanej metodike samostatnou vrstvou, nie iba poznámkou k výške korunovej bázy. Tento rozdiel je podstatný. Nízka živá vetva jedného stromu nemusí vytvárať funkčnú cestu horenia, zatiaľ čo súvislé zmladenie alebo krovinná vrstva môže preklenúť niekoľkometrovú medzeru medzi povrchom a korunami. Práve vertikálna kontinuita je preto predmetom terénneho hodnotenia.

Na každej hlavnej ploche sa hodnotí päť vertikálnych profilov. Profil sa delí na výškové pásma 0-0,5 m, >0,5-1 m, >1-2 m, >2-4 m a >4 m až po funkčnú bázu hlavnej korunovej vrstvy. V každom pásme sa zaznamenáva prítomnosť paliva, jeho približná pokrývnosť a dominantný typ - bylinné palivo, kroviny, zmladenie, spodné suché vetvy alebo živé vetvy.

Z profilov sa odvodí tri základné charakteristiky: počet obsadených výškových pásiem, najväčšia vertikálna medzera bez významného paliva a funkčné spojenie s hlavnou korunou. Tieto parametre zostávajú uložené samostatne. Až následne sa z nich vytvorí päťstupňová trieda rebríkového paliva.

Trieda 1 predstavuje prakticky neprítomné rebríkové palivo. Trieda 2 zodpovedá nízkej a prerušovanej vrstve bez spojenia s korunou. Trieda 3 predstavuje strednú vertikálnu kontinuitu s výraznou medzerou. Trieda 4 označuje vysokú kontinuitu s malými prerušeniami a trieda 5 súvislú vertikálnu cestu od povrchovej alebo krovinej vrstvy k hlavnej korune. Hranice tried sú navrhnuté ako pracovné a majú byť po získaní dostatočného slovenského referenčného súboru kalibrované.

Takéto oddelenie pôvodných profilových údajov od výslednej triedy je zámerné. Ak sa neskôr ukáže, že pre slovenské podmienky je vhodnejšia iná hranica medzi triedami, možno klasifikáciu prepočítať bez opakovania terénneho merania.

Vzťah medzi profilovými charakteristikami a pracovnou triedou rebríkového paliva uvádza tabuľka 15.

Tabuľka 15 Navrhovaná pracovná klasifikácia rebríkového paliva

Trieda	Charakter vertikálnej štruktúry	Typická interpretácia
1	bez významnej vrstvy medzi povrchom a korunou	veľmi nízky potenciál vertikálneho prenosu
2	nízka alebo lokálna vrstva, veľké vertikálne medzery	nízky potenciál
3	viac obsadených vrstiev, ale zachovaná výrazná medzera	stredný potenciál
4	takmer súvislý profil, iba malé prerušenia	vysoký potenciál
5	súvislá cesta paliva od povrchu alebo krovín po hlavnú korunu	veľmi vysoký potenciál

3.8. Korunové palivo: merané, odvodené a modelované parametre

Pri korunovom palive je osobitne dôležité nepoužívať jazyk, ktorý by modelovaný parameter prezentoval ako priame terénne meranie. Výška stromu alebo výška bázy koruny môžu byť terénne zistené. Plošné množstvo jemného korunového paliva však spravidla vzniká z alometrického vzťahu a objemová hustota korún je ďalším odvodeným alebo modelovaným parametrom.

Na hlavnej ploche sa zaznamenáva drevina a hrúbka všetkých stromov nad zvolenú registračnú hranicu. Výška sa meria na reprezentatívnom súbore stromov pokrývajúcim hlavné dreviny a hrúbkové triedy. Ak sa na ďalšie odvodenie používajú lidarové údaje, terénne meranie má byť definované tak, aby bolo porovnateľné s príslušnou lidarovou metrikou.

Výška korunovej bázy sa chápe funkčne. Ide o spodnú hranicu súvislej korunovej vrstvy schopnej podieľať sa na vertikálnom prenose horenia. Najnižšia jednotlivá živá vetva preto nemusí určovať výslednú hodnotu. Pri viacvrstvovom poraste sa funkčná báza interpretuje spolu s údajmi o rebríkovom palive.

Hĺbka korunovej vrstvy sa určí ako rozdiel charakteristickej výšky porastu a výšky korunovej bázy (43):

$$H_k = H_p - V_{kb} \quad (43)$$

kde

H_k – hĺbka korunovej vrstvy (m)

H_p – charakteristická výška porastu (m)

V_{kb} – výška korunovej bázy (m)

Plošné množstvo korunového paliva sa odvodzuje zo suchej hmotnosti jemnej korunovej biomasy stromov na hodnotenej ploche (44):

$$N_{kp} = \frac{\Sigma m_k}{A} \quad (44)$$

kde

N_{kp} – plošné množstvo korunového paliva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Σm_k – súčet suchej hmotnosti dostupného jemného korunového paliva stromov (kg)

A – plocha, ku ktorej sa biomasa vzťahuje (m^2)

Ak sa použije zjednodušené priemerné vyjadrenie objemovej hustoty korunového paliva, možno ju určiť pomerom plošného množstva korunového paliva a hĺbky korunovej vrstvy (45):

$$\rho_k = \frac{N_{kp}}{H_k} \quad (45)$$

Takto získaná hodnota je modelovaný priemer za korunovú vrstvu. Ak sa používa profilový prístup s pohyblivým výškovým oknom, môže byť výsledkom lokálne maximum objemovej hustoty. Obe hodnoty sú metodicky odlišné a nemajú sa zamieňať.

Pre slovenské podmienky je dôležité, aby použité alometrické vzťahy rešpektovali drevinu a rozsah veľkostí stromov. Ak domáca alebo regionálne vhodná rovnica nie je dostupná, možno použiť najbližší overený vzťah, ale výsledok sa označí zvýšenou neistotou. Cieľom navrhovanej metodiky nie je vytvárať zdanlivo presné čísla tam, kde empirická opora chýba.

Rozlíšenie korunových parametrov podľa spôsobu ich vzniku sumarizuje tabuľka 16.

Tabuľka 16 Korunové parametre a ich metodický status

Parameter	Jednotka	Spôsob získania	Status
výška porastu	m	terénne meranie a/alebo Lidar	meraný alebo odvodený
výška korunovej bázy	m	funkčné terénne určenie; Lidar po kalibrácii	meraný/interpretovaný alebo odvodený
hĺbka korunovej vrstvy	m	rozdiel výšky porastu a bázy koruny	odvodený
korunová pokrývnosť	%	terén, ortofoto, Lidar	meraný alebo odvodený
Plošné množstvo korunového paliva	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	alometria + stromová inventarizácia	modelovaný
objemová hustota korunového paliva	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	množstvo paliva a objem koruny / profilový model	modelovaný

3.9. Vlhkosť paliva ako oddelená dynamická vrstva

Vlhkosť je jedným z najpremenlivejších parametrov palivového komplexu. Z toho dôvodu sa v navrhovanej metodike neukladá ako nemenná vlastnosť palivového typu. Viaz sa na konkrétny dátum, čas a palivovú zložku.

Vzorka jemného odumretého povrchového paliva sa po odbere bezodkladne uzavrie do obalu s minimálnou výmenou vlhkosti s okolím. Zaznamená sa čas odberu a čas prvého váženia. Živé bylinné a krovinné palivo sa odoberá samostatne a zaznamenáva sa jeho fenologický stav.

Gravimetrická vlhkosť vyjadrená na suchej báze sa určí vzťahom (46):

$$M = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (46)$$

kde

M – vlhkosť paliva (%)

m_v – hmotnosť vlhkej vzorky (g)

m_s – hmotnosť suchej vzorky (g)

Metodicky dôležité je, že rovnaká referenčná plocha môže mať počas roka viacero záznamov vlhkosti, ale iba jeden aktuálny štruktúrny profil, pokiaľ sa porast nezmenil zásahom alebo disturbanciou. Toto oddelenie umožňuje kombinovať mapu paliva s meteorologickými údajmi a vytvárať časovo premenlivé vstupy bez potreby opätovne klasifikovať celý porast.

Pri validácii modelov vlhkosti sa čas terénneho odberu musí zosúladiť s meteorologickým alebo diaľkovo snímaným údajom. Pri jemnom odumretom palive môže niekoľkohodinový rozdiel predstavovať významnú zmenu a nesmie sa ignorovať.

3.10. Dátový tok, kontrola kvality a sledovateľnosť

Navrhovaná metodika predpokladá, že terénny formulár a geodatabáza používajú rovnakú identifikačnú logiku. Každá lokalita, hlavná plocha, odberový rámec, transekt a vertikálny profil majú vlastný stabilný identifikátor. Kód musí umožniť jednoznačne zistiť, ku ktorej hlavnej ploche čiastkové meranie patrí.

Surová terénna hodnota sa po importe do databázy neprepisuje. Ak sa zistí chyba, vytvorí sa opravená hodnota a zaznamená dôvod zmeny. Tento princíp je dôležitý najmä pri dlhodobom aktualizáčnom cykle, keď sa môžu meniť výpočtové pravidlá alebo klasifikačné hranice.

Kontrola kvality má štyri úrovne. Formálna kontrola preveruje úplnosť povinných polí. Fyzikálna kontrola preveruje prípustný rozsah hodnôt. Logická kontrola sleduje vzťahy medzi parametrami, napríklad že výška korunovej bázy nemôže prekročiť výšku porastu. Priestorová kontrola preveruje polohu plochy voči JPRL, ortofotomape a ostatným vrstvám.

Nulová hodnota a chýbajúca hodnota sa vedú oddelene. Nula znamená, že parameter bol zisťovaný a nebol prítomný. Chýbajúca hodnota znamená, že údaj nebol získaný alebo nie je spoľahlivo určiteľný. Pri modelovaní je tento rozdiel zásadný.

Každý odvodený alebo modelovaný parameter má okrem hodnoty aj atribút „zdroj_udaja“, „metoda_odv“, „datum_sprac“ a „neistota“. Pri meraných hodnotách sa uchováva „datum_mer“, „cas_mer“, „presn_pol“ a podľa potreby identifikátor zariadenia alebo laboratórnej metódy.

Fotodokumentácia sa používa ako kontrolný záznam. Minimálny súbor tvorí snímka povrchu, štyri horizontálne pohľady a fotografia zvislej štruktúry. Fotografia nenahrádza meranie, ale umožňuje spätne posúdiť neobvyklú hodnotu, prechodovú situáciu alebo zmenu porastu.

Odporúčaná identifikačná a kontrolná štruktúra údajov je uvedená v tabuľke 17.

Tabuľka 17 Základné polia pre identifikáciu, pôvod a kontrolu terénnych údajov

Kód poľa	Význam	Typ/jednotka
id_lokalita	jedinečný identifikátor lokality	text
id_plochy	jedinečný identifikátor hlavnej plochy	text
id_odberu	identifikátor odberového rámca	text
id_transektu	identifikátor transektu	text
id_profilu	identifikátor vertikálneho profilu	text
datum_mer	dátum merania	dátum
cas_mer	čas merania	čas
presn_pol	polohová presnosť	m
zdroj_udaja	meraný / odvodený / modelovaný	kód
metoda_odv	metóda alebo verzia odvodenia	text/kód
neistota	číselná alebo triedna neistota	hodnota/trieda

3.11. Prechod od terénneho merania k palivovej mape

Terénna plocha nie je cieľom metodiky. Je referenčným miestom, z ktorého sa vytvára vzťah medzi fyzicky zisteným palivom a geopriestorovými premennými. Tento prechod musí byť kontrolovaný, pretože meranie na malej ploche nemožno mechanicky rozšíriť na celý porast alebo rastrovú bunku.

Pri každom palivovom parametri sa najskôr určí jeho priestorová podpora. Množstvo paliva z rámca 0,5 × 0,5 m je lokálne meranie. Priemer piatich rámcov charakterizuje hlavnú plochu lepšie, ale stále obsahuje variabilitu vo vnútri plochy. Korunový parameter odvodený z celej plochy má inú podporu. Pri priestorovom modelovaní sa tieto rozdiely zachovávajú.

Pracovná bunka 10 × 10 m je spoločným technickým a priestorovým nosičom výsledných vrstiev, nie automatickým vyjadrením skutočnej presnosti všetkých parametrov. Ak je vstup odvodený z porastového priemeru alebo z hrubšieho klimatického rastra, jeho efektívne informačné rozlíšenie zostáva hrubšie. Tento princíp nadväzuje na kapitolu 2 a zabráňuje falošnému dojmu, že prevzorkovanie vytvorilo novú informáciu.

Palivový profil má prednosť pred okamžitým priradením štandardného palivového modelu. Najskôr sa vytvoria fyzické vrstvy – množstvo paliva, hĺbka, spojitosť, rebríkové palivo, korunová báza, množstvo korunového paliva a hustota korún. Až následne možno podľa účelu vykonať prevod na štandardný alebo lokálne kalibrovaný palivový model. Vďaka tomu zostávajú údaje využiteľné aj pri zmene modelovacieho systému.

Pre slovenské podmienky má tento prístup ešte jednu výhodu. Umožňuje vytvoriť spätnú väzbu medzi existujúcou lesníckou evidenciou a reálne nameraným palivom. Ak sa napríklad určitá kombinácia HSLT, drevinového zloženia a vývojového štádia opakovane spája s podobným palivovým profilom, možno ju neskôr použiť ako vysvetľujúcu premennú pri modelovaní na celom území Slovenskej republiky. Ak sa naopak ukáže vysoká variabilita, metodika nevnučuje jednej lesníckej kategórii jediný palivový model.

Navrhovaný prístup tak predstavuje rozšírenie predchádzajúceho slovenského mapovania povrchového paliva smerom k plnému trojrozmernému palivovému profilu. Jeho inovácia nespočíva v jednej novej meracej pomôcke, ale v logike celého systému: slovenská typologická a lesnícka stratifikácia, viacúrovňová terénna jednotka previazaná s mriežkou 10 × 10 m, spoločné hodnotenie povrchového, rebríkového a korunového paliva, oddelenie statickej štruktúry od dynamickej vlhkosti a zachovanie pôvodu a neistoty každej hodnoty.

Takto vytvorená referenčná báza je použiteľná pre mapovanie paliva, kalibráciu národných palivových modelov, hodnotenie nebezpečenstva a rizika vzniku požiaru aj pre modelovanie správania požiaru. Súčasne zostáva otvorená budúcej aktualizácii: klasifikačné prahy a modelové vzťahy možno meniť bez straty pôvodných meraných údajov.

4. TVORBA GEODATABÁZY LESNÉHO PALIVA SLOVENSKA

Geodatabáza lesného paliva Slovenska predstavuje dátový rámec, ktorý prepája terénne a laboratórne merania, lesnícke a typologické údaje, topografické a environmentálne podklady, údaje DPZ, odvodené palivové parametre, palivové modely, dynamické stavové veličiny, overovacie údaje, informácie o dátovej podpore a neistote a metadáta. Jej úlohou nie je iba uchovávanie výsledných mapových vrstiev, ale zabezpečenie sledovateľného prechodu od pôvodného zdroja cez meranie alebo odvodenie až po výslednú hodnotu používanú pri mapovaní paliva, modelovaní správania požiaru a hodnotení požiarneho rizika.

Navrhovaná geodatabáza sa člení podľa odborného významu, pôvodu a stupňa spracovania údajov, nie iba podľa ich technického formátu. Samostatne sa vedú pôvodné zdrojové údaje, terénne a laboratórne záznamy, harmonizované pracovné vstupy, analytické palivové parametre, klasifikačné a modelové výsledky, dynamické údaje, nezávislé overovacie údaje, údaje o pôvode, dátovej podpore a neistote a metadáta. Takéto členenie umožňuje zachovať rozdiel medzi hodnotou priamo meranou, odvodenou, modelovanou a klasifikačne priradenou.

Geodatabáza sa navrhuje ako aktualizovateľný a verziovaný systém. Pôvodné merané a zdrojové údaje sa pri zmene klasifikačných hraníc, modelov alebo spôsobu priestorového odvodenia neprepisujú. Nová metodika, nový model alebo nový vstup vytvárajú novú verziu odvodeného produktu, pričom zostáva zachovaná väzba na údaje, z ktorých vznikol. Základným princípom je preto oddelenie fyzikálne interpretovateľného palivového profilu od konkrétneho palivového typu, palivového modelu alebo hodnotiaceho indexu.

4.1. Úloha geodatabázy pri spracovaní údajov o palive

Geodatabáza zabezpečuje spoločný dátový rámec pre údaje, ktoré vznikajú na rozdielnych priestorových, časových a metodických úrovniach. Umožňuje prepájať terénne merania, laboratórne údaje, lesnícke a typologické podklady, digitálne modely reliéfu, optické a radarové družicové údaje, lidarové údaje a modelované palivové charakteristiky bez straty informácie o ich pôvode.

Základnou požiadavkou je sledovateľnosť každej výslednej hodnoty. Pri palivovom parametri musí byť možné určiť, z akého zdroja vznikol, ku ktorej priestorovej jednotke a obdobiu sa vzťahuje, či bol meraný, odvodený, modelovaný alebo klasifikačne priradený, aká metóda bola použitá a aká neistota alebo dátová podpora je s hodnotou spojená. Sledovateľnosť sa zabezpečuje stabilnými identifikátormi, dátovým slovníkom, metadátami a verziovaním odvodených produktov.

Geodatabáza vytvára spojenie medzi detailným rastrovým spracovaním a JPRL. Raster umožňuje zachovať vnútornú heterogenitu palivových podmienok, zatiaľ čo JPRL poskytuje praktickú agregáciu jednotku pre lesnícke plánovanie, protipožiarnu ochranu a manažment územia. JPRL sa však nepovažuje automaticky za homogénnu palivovú jednotku; pri agregácii sa preto zachovávajú aj plošné podiely tried, variabilita spojitých parametrov a podiel plochy s platnými údajmi.

Geodatabáza zároveň oddeľuje relatívne stabilné štruktúrne charakteristiky od dynamických stavových parametrov. Typ paliva, výška porastu alebo korunová štruktúra môžu byť platné dlhšie obdobie, zatiaľ čo vlhkosť jemného odumretého paliva sa viaže na konkrétny dátum a čas. Dynamická veličina sa preto

neukladá ako jedna prepisovateľná hodnota stabilnej vrstvy, ale ako časovo označený záznam alebo samostatná časová vrstva.

4.2. Návrh štruktúry geodatabázy

Štruktúra geodatabázy sa navrhuje tak, aby boli údaje oddelené podľa ich funkcie, pôvodu a stupňa spracovania. Zdrojová, pracovná a výsledná vrstva sa nesmú viesť ako jedna postupne prepisovaná vrstva. Každý stupeň spracovania sa vedie samostatne a musí byť spätne identifikovateľný. Základné logické skupiny údajov, ich obsah a hlavná funkcia sú uvedené v tabuľke 18.

Tabuľka 18 Základná logická štruktúra geodatabázy lesného paliva

Skupina	Obsah	Hlavná funkcia
Zdrojové údaje	pôvodné nezmenené lesnícke, topografické, environmentálne a diaľkovo snímané údaje	archivácia a reprodukcia vstupov
Terénne údaje	lokality, plochy, odberové rámce, tranzekty, vertikálne profily, fotografie	referenčné meranie a odborný opis
Laboratórne údaje	suchá hmotnosť, vlhkosť, požiarne vlastnosti a ďalšie merané charakteristiky	kvantifikácia a charakterizácia paliva
Harmonizované pracovné údaje	geometricky, časovo a atribútovo zosúladené vstupy	analytické GIS spracovanie
Palivové parametre	povrchové, rebríkové a korunové charakteristiky	primárne analytické výstupy
Dynamické údaje	vlhkosť a ďalšie časovo premenlivé veličiny	aktuálny stav paliva
Klasifikačné údaje	palivové typy, triedy rebríkového paliva a ďalšie odvodené kategórie	tematická klasifikácia
Palivové modely	referenčné alebo odvodené modely pre konkrétny modelovací systém	modelovanie správania požiaru
Overovacie údaje	nezávislé referenčné plochy a výsledky overenia	hodnotenie presnosti a prenositeľnosti
Pôvod, dátová podpora a neistota	pôvod hodnoty, extrapolácia, modelová podpora, neistota	interpretácia obmedzení
Číselníky a pravidlá	dátový slovník, prípustné hodnoty, klasifikačné prahy, prevodové tabuľky	jednoznačná interpretácia a reprodukovateľnosť
Metadáta a verzie	zdroje, dátumy, verzie modelov a pracovných postupov	sledovateľnosť a aktualizácia

Na fyzickej úrovni možno logickú štruktúru realizovať v jednej relačnej geodatabáze alebo vo viacerých vzájomne prepojených dátových kontajneroch. Rozhodujúce nie je konkrétne softvérové riešenie, ale zachovanie identifikátorov, významu polí, relácií a verzií. Prenositeľnosť medzi GIS prostrediami podporuje používanie otvorených a štandardizovaných formátov.

4.3. Grafické a numerické údaje v geodatabáze

Grafické údaje vytvárajú priestorový nosič databázových informácií. Podľa typu objektu sa používajú bodové, líniové, polygónové a rastrové geometrie. Bodové objekty reprezentujú najmä odberové miesta a profilové body, línie transektu a významné líniové prerušenia paliva, polygóny terénne plochy, JPRL a ďalšie územné jednotky a raster priestorovo súvislé palivové parametre.

Numerické a kategorizované údaje sa ukladajú ako atribúty alebo v relačne prepojených tabuľkách. Každý parameter musí mať jednoznačnú definíciu, kód, jednotku, dátový typ, prípustný rozsah a spôsob vzniku. Kategorizované údaje sa viažu na číselníky; spojité údaje sa uchovávajú v pôvodnej číselnej podobe aj vtedy, ak sa následne prevádzajú do tried.

Opakované merania sa vedú ako samostatné časové záznamy. Vlhkosť alebo iný dynamický parameter sa nesmie prepisovať jednou aktuálnou hodnotou bez zachovania predchádzajúceho stavu. Relačná väzba musí umožniť zobraziť časový rad pre konkrétnu plochu, odber, palivovú zložku alebo analytickú jednotku.

Priestorová geometria a odborná hodnota sa nesmú zamieňať. Zmena symboliky, prezentačnej klasifikácie alebo formátu exportu nesmie meniť pôvodný analytický parameter. Rovnaká dátová vrstva môže mať viacero kartografických reprezentácií podľa účelu použitia.

4.4. Atribútová štruktúra databázových vrstiev

Atribútová štruktúra vychádza z jednotného dátového slovníka. Kód poľa je krátky, stabilný, v slovenskom jazyku a zapisuje sa bez diakritiky. Úplný význam, jednotka, dátový typ, prípustný rozsah, spôsob vzniku a verzia definície sa vedú v dátovom slovníku. Rovnaký odborný parameter má používať rovnaký kód v terénnom zázname, geodatabáze, rastrovom výstupe, metadátach a exporte, pokiaľ technický formát nevyžaduje inú reprezentáciu. Odporúčané skupiny atribútov a príklady kódov polí sú uvedené v tabuľke 19.

Tabuľka 19 Odporúčané skupiny atribútov a kódy polí

Skupina	Príklady polí	Význam
Identifikácia	id_lokality, id_plochy, id_odberu, id_transektu, id_profilu	jednoznačná identifikácia a relačné väzby
Čas a poloha	datum_mer, cas_mer, presn_pol, plocha_m2	časová platnosť a priestorová podpora
Povrchové palivo	typ_povrch, nositel_sir, mnoz_jem, mnoz_byl, mnoz_krov, mnoz_drevo	typ a množstvo hlavných zložiek
Povrchová štruktúra	hlb_opad, hlb_hrab, hlb_lozko, obj_hust_pov, pokryv_pov, spojit_pov, rozklad	hlbka, hustota, pokryvnosť a kontinuita
Živé/odumreté a vlhkosť	podiel_zive, podiel_odum, vlhk_jem, vlhk_zive	stav povrchového paliva
Rebríkové palivo	rozsah_rebr, pocet_vrst, medzera_vrs, spojit_zvis, tried_rebr, vyska_rebr_d, vyska_rebr_h	vertikálny profil a odvodená trieda
Korunové palivo	vyska_por, vyska_kor_b, hlb_kor, pokryv_kor, mnoz_kor, obj_hust_kor, spojit_kor, odum_kor, vlhk_kor	geometrické a biometrické parametre koruny

Skupina	Príklady polí	Význam
Pôvod a kvalita	povod_udaja, zdroj_udaja, metoda_odv, verzia_met, podpora_dat, neistota, poznamka	sledovateľnosť, dátová podpora, neistota a dokumentácia

Základný atribút „povod_udaja“ rozlišuje hodnotu meranú, odvodenú, modelovanú alebo klasifikačne priradenú. Pole „zdroj_udaja“ uvádza konkrétny zdroj, napríklad terénne meranie, lidarový produkt, lesnícku databázu alebo družicový produkt. Pole „metoda_odv“ opisuje konkrétny spôsob vzniku hodnoty a „verzia_met“ identifikuje použitú verziu postupu, modelu alebo klasifikačného pravidla.

Nula sa nesmie zamieňať s chýbajúcou hodnotou. Hodnota 0 znamená, že parameter bol zisťovaný a zistená hodnota bola nulová. „NULL“ alebo „NoData“ znamená, že údaj nebol získaný, nie je použiteľný alebo ho nemožno spoľahlivo určiť. Toto rozlíšenie sa musí zachovať v terénnych tabuľkách, geodatabáze, rastrových vrstvách aj exportoch.

4.5. Rastrové vrstvy priestorovej distribúcie paliva

Rastrové vrstvy predstavujú priestorovo súvislé vyjadrenie jednotlivých palivových parametrov. Ako spoločný technický a priestorový rámec sa navrhuje mriežka 10 × 10 m. Táto veľkosť bunky nepredstavuje automaticky skutočnú informačnú podrobnosť všetkých vstupov; pri každej vrstve sa preto eviduje pôvodné rozlíšenie alebo podporná plocha zdroja a spôsob priestorového odvodu.

Samostatne sa vytvárajú rastrové vrstvy povrchového, rebríkového a korunového paliva. Spojité parametre sa uchovávajú v pôvodných jednotkách a kategorizované parametre prostredníctvom stabilných kódov. Pôvodná spojitá hodnota sa po prevode na klasifikačnú triedu neodstraňuje. Trieda je odvodený atribút, ktorý možno pri zmene klasifikačných hraníc prepočítať bez straty pôvodnej informácie.

Medzi základné rastrové výstupy patria najmä typ povrchového paliva, dominantný nositeľ šírenia, množstvo jednotlivých povrchových zložiek, hĺbka palivového lôžka, horizontálna kontinuita, parametre rebríkového paliva, výška porastu, výška korunovej bázy, korunová pokrývnosť, plošné množstvo a objemová hustota korunového paliva a horizontálna kontinuita korún. Dynamická vlhkosť sa vedie ako časovo označená samostatná vrstva.

Reklasifikácia do spoločnej ordinálnej škály sa vykonáva iba pri konkrétnom následnom hodnotiacom modeli, ktorý takýto prevod vyžaduje. Nie je vlastnosťou základnej palivovej geodatabázy. Rovnakým spôsobom sa palivový model používaný v konkrétnom systéme správy požiaru vedie ako odvodený výstup, nie ako náhrada pôvodných fyzikálnych parametrov. Odporúčaný súbor základných rastrových vrstiev je zhrnutý v tabuľke 20.

Tabuľka 20 Odporúčaný súbor základných rastrových vrstiev

Skupina	Kľúčové vrstvy/kódy	Typ
Povrchové palivo	typ_povrch, nositel_sir, mnoz_jem, mnoz_byl, mnoz_krov, mnoz_drevo, hlb_lozko, spojit_pov	kategorizované a spojité
Rebríkové palivo	rozsah_rebr, pocet_vrst, medzera_vrst, spojit_zvis, tried_rebr	spojité, diskkrétne a kategorizované
Korunové palivo	vyska_por, vyska_kor_b, hlb_kor, pokryv_kor, mnoz_kor, obj_hust_kor, spojit_kor	spojité a kategorizované

Skupina	Kľúčové vrstvy/kódy	Typ
Dynamický stav	vlhk_jem, vlhk_zive, vlhk_kor podľa dátumu a času	časovo viazané spojité
Pôvod a neistota	povod_udaja, podpora_dat, neistota alebo samostatné pomocné vrstvy	kategorizované a spojité

4.6. Vektorové vrstvy a ich tematické využitie

Vektorové vrstvy sa používajú tam, kde je potrebné zachovať identitu konkrétnych priestorových objektov. Patria sem terénne plochy, odberové body, transekty, vertikálne profily, JPRL, administratívne a hospodárske jednotky, líniové prerušenia paliva a vrstvy udalostí meniacich palivový komplex. Základné vektorové vrstvy geodatabázy a ich hlavné funkcie sú uvedené v tabuľke 21.

JPRL slúži ako praktická agregačná jednotka, nie ako náhrada detailnej palivovej geometrie. Pri každej JPRL sa odporúča ukladať okrem dominantnej triedy aj plošné podiely významných tried, súhrnné spojité parametre, mieru variability a podiel plochy s platnými údajmi. Dominantná trieda sama osebe nemusí vystihnúť heterogénny porast.

Pri spojitom parametri možno pri agregácii z rastrových buniek alebo čiastkových objektov použiť plošne vážený priemer, ak je takáto agregácia v súlade s fyzikálnym významom parametra. Plošne vážený priemer možno vyjadriť vzťahom (47):

$$\bar{x}_j = \frac{(\sum A_i x_i)}{(\sum A_i)} \quad (47)$$

kde

$\bar{x}_j$ – agregovaná hodnota parametra pre jednotku J

x_i – hodnota v i-tej bunke alebo čiastkovom objekte

A_i – plocha tej časti, ktorá leží v agregovanej jednotke

Do výpočtu sa nezahŕňajú bunky bez platnej hodnoty; ich podiel sa eviduje samostatne ako dátové pokrytie.

Pri kategorizovaných vrstvách sa dominantná trieda dopĺňa plošnými podielmi jednotlivých tried. Plošný podiel triedy k v jednotke J možno vyjadriť ako podiel plochy buniek príslušnej triedy k platnej ploche jednotky.

Pri kategorizovaných vrstvách sa dominantná trieda dopĺňa plošnými podielmi jednotlivých tried. Plošný podiel triedy k v jednotke J možno vyjadriť vzťahom (48):

$$p_{k,j} = \frac{\sum A_i \cdot I(c_i = k)}{\sum A_i} \cdot 100 \quad (48)$$

kde

$p_{k,j}$ – plošný podiel triedy k v jednotke J v %,

c_i – trieda i-tej bunky

I – indikátorová funkcia s hodnotou 1, ak bunka patrí do triedy k, inak 0.

Bunky bez údajov sa do menovateľa nezahŕňajú a ich rozsah sa vykazuje samostatne.

Tabuľka 21 Základné vektorové vrstvy geodatabázy

Vrstva	Geometria	Hlavná funkcia
Terénne plochy	polygón	identita plochy, priestorová podpora a väzba na merania
Odberové a profilové body	bod	lokalizácia čiastkových meraní a vzoriek
Tranzekty	lína	ležiace drevo, kontinuita a ďalšie líniové zisťovanie
JPRL	polygón	agregácia a praktická interpretácia
Prerušenia paliva	lína/polygón	cesty, vodné plochy, bezlesie a potenciálne bariéry
Udalosti	polygón/lína/bod	ťažba, kalamita, požiar, preventívny zásah a ďalšie spúšťače aktualizácie

4.7. Väzba medzi terénnymi údajmi, atribútmi a priestorovými vrstvami

Prepojenie medzi terénnym zisťovaním a geodatabázou sa realizuje prostredníctvom stabilných identifikátorov. Terénna lokalita, hlavná plocha, odberový rámec, tranzekt a vertikálny profil majú samostatné identifikátory, ktoré sa používajú v celom spracovateľskom reťazci. Identifikátor sa nemení pri zmene interpretácie alebo klasifikačného zaradenia.

Geodatabáza musí zachovať hierarchiu merania. Hodnota z odberového rámca $0,5 \times 0,5$ m nie je totožná s hodnotou hlavnej terénnej plochy ani s hodnotou pracovnej bunky 10×10 m. Pri každom parametri sa preto eviduje priestorová podpora, z ktorej hodnota vznikla, a pravidlo, ktorým bola transformovaná na vyššiu priestorovú úroveň.

Priestorové odvodenie z terénnej plochy do rastrovej vrstvy vytvára novú hodnotu s vlastným pôvodom. Výsledná bunka musí byť spätne prepojitelná s použitým modelom, vysvetľujúcimi premennými a referenčnými plochami použitými pri kalibrácii alebo overení. Modelovaná hodnota sa nesmie prezentovať ako priame meranie.

Terénny palivový profil zostáva základným referenčným záznamom. Palivový typ alebo palivový model je následným odvodeným atribútom a nesmie nahradiť pôvodné fyzikálne parametre. Vďaka tomu možno klasifikačné pravidlá alebo modelovací systém meniť bez opakovania terénneho zberu.

4.8. Formáty údajov, metadáta a dokumentácia výstupov

Výber formátu sa riadi typom, účelom a spôsobom distribúcie údajov. Pre vektorové analytické vrstvy je vhodný napríklad GeoPackage, ktorý OGC definuje ako otvorený, prenosný a platformovo nezávislý kontajner založený na SQLite (OGC, 2024a). Pre rastrové analytické produkty je vhodný GeoTIFF; pri webovej alebo cloudovej distribúcii možno použiť Cloud Optimized GeoTIFF, ktorý umožňuje efektívny čiastkový prístup k rastrovým údajom (OGC, 2019; OGC, 2023). CSV alebo XLSX možno používať na tabuľkové výmeny. PDF, PNG alebo prezentačný TIFF slúžia na grafické zobrazenie a nenahrádzajú analytický dátový produkt.

Metadáta sa vytvárajú priebežne počas spracovania, nie spätne po ukončení projektu. ISO 19115-1 stanovuje rámec na opis identifikácie, rozsahu, kvality, priestorových a časových vlastností, obsahu, referenčného systému a distribúcie geografických údajov (ISO 19115-1:2014). Informácie o kvalite a spôsobe jej hodnotenia sa dokumentujú v súlade s princípmi ISO 19157-1:2023.

Každá výsledná rastrová alebo vektorová vrstva musí mať minimálne názov, kód parametra podľa dátového slovníka, odbornú definíciu, jednotku, dátový typ, súradnicový referenčný systém, priestorový rozsah, veľkosť bunky alebo geometrickú jednotku, pôvodnú informačnú podrobnosť vstupov, referenčné obdobie, zdroj, pôvod hodnoty, spôsob odvodenia, verziu modelu alebo klasifikačného pravidla, dátum vytvorenia a aktualizácie, kódovanie chýbajúcich údajov, výsledok overenia, dátovú podporu, neistotu a obmedzenia použitia.

Ak bola výsledná vrstva vytvorená z viacerých vstupov, dokumentácia musí umožniť späťne identifikovať rozhodujúce zdroje a pracovný postup. Verzia mapovej vrstvy sa preto neviaže iba na dátum exportu, ale aj na konkrétnu kombináciu vstupov, algoritmov, klasifikačných pravidiel a modelov. Minimálny rozsah metadát výslednej vrstvy je zhrnutý v tabuľke 22.

Tabuľka 22 Minimálny rozsah metadát výslednej vrstvy

Oblasť metadát	Minimálny obsah
Identifikácia	názov vrstvy; kód parametra; verzia; správca/autor
Význam	odborná definícia; jednotka; dátový typ; číselník alebo prípustný rozsah
Priestor	súradnicový systém; rozsah; veľkosť bunky/geometria; pôvodná podpora alebo rozlíšenie
Čas	referenčné obdobie; dátum vytvorenia; dátum aktualizácie
Pôvod	zdroj údajov; kategória pôvodu; spôsob odvodenia; verzia modelu alebo pravidla
Kvalita	spôsob overenia; dátová podpora; neistota; rozsah extrapolácie
Distribúcia	formát; licencia; obmedzenia použitia; väzba na analytický zdroj

4.9. Kontrola kvality údajov a identifikácia neúplností

Kontrola kvality geodatabázy sa vykonáva priebežne a musí pokrývať úplnosť, fyzikálnu a biologickú prípustnosť, logickú konzistenciu, geometrickú správnosť a časovú platnosť údajov. Rámec hodnotenia kvality geografických údajov možno dokumentovať podľa princípov ISO 19157-1:2023, pričom konkrétne pravidlá pre palivové parametre sú doménovou súčasťou navrhovanej metodiky. Základné úrovne kontroly kvality geodatabázy sú uvedené v tabuľke 23.

Tabuľka 23 Základné úrovne kontroly kvality geodatabázy

Úroveň	Kontrolované prvky	Postup
Úplnosť	povinné identifikátory, jednotky, dátum, pôvod, geometria a väzby	chýbajúce povinné polia sa označia a záznam sa nepoužije bez rozhodnutia
Fyzikálne a biologické rozsahy	množstvo paliva ≥ 0 ; pokryvnosť 0–100 %; výška korunovej bázy $\leq$ výška porastu; hĺbka koruny ≥ 0	nepřípustná hodnota sa označí ako chyba, neopravuje sa automaticky
Logické väzby	súlady medzi typom paliva, množstvom, pokryvnosťou, korunovou štruktúrou a časom	rozpory sa preveria voči zdroju a terénnej dokumentácii
Priestorová kvalita	platná geometria, poloha, spoločný referenčný systém, súlad mriežok	chyby sa opravujú dokumentovaným postupom

Časová kvalita	referenčné obdobie vstupov, časový rozdiel k terénemu meraniu, platnosť po udalosti	zastarané hodnoty sa neprepisujú, ale označia obmedzenou platnosťou
Pôvod a neistota	vyplnený pôvod, metóda, verzia, dátová podpora a neistota	hodnota bez sledovateľného pôvodu sa nepovažuje za plnohodnotný analytický údaj

Extrémna hodnota sa automaticky neodstraňuje. Najskôr sa preverí voči zdrojovému záznamu, fotografii, susedným meraniam a logickým väzbám. Ak ide o reálny extrém, zachová sa. Ak ide o chybu, oprava sa dokumentuje a pôvodná hodnota zostáva dohľadateľná v pracovnom zázname alebo histórii verzie.

Dátové pokrytie agregovanej jednotky sa vyjadruje samostatne, aby sa priemerná hodnota neinterpretovala rovnako pri úplnom a pri veľmi neúplnom pokrytí. Dátové pokrytie možno vyjadriť vzťahom (49):

$$D_j = \left(\frac{A_{platná,j}}{A_{celková,j}} \right) \cdot 100 \quad (49)$$

kde

D_j – dátové pokrytie jednotky J (%)

$A_{platná,j}$ – plocha s platnými hodnotami

$A_{celková,j}$ – celková hodnotená plocha jednotky

Prah prijateľného pokrytia sa nestanovuje univerzálne, ale podľa účelu vrstvy a variability parametra.

4.10. Vizualizácia geodatabázových výstupov

Vizualizácia je prezentačnou vrstvou oddelenou od analytickej hodnoty. Symbolika sa neukladá ako náhrada odborného parametra a jej zmena nesmie meniť hodnoty databázy. Rovnaká analytická vrstva môže mať rozdielnu symboliku pre odbornú analýzu, celoštátnu prezentáciu alebo lokálne rozhodovanie.

Kategorizované vrstvy používajú stabilný číselník a jednoznačné názvy tried. Pri spojitých vrstvách sa uvádza jednotka, rozsah hodnôt a spôsob rozdelenia do zobrazovaných intervalov. Ak sa mapy porovnávajú medzi rokmi, regiónmi alebo scenármi, používajú sa rovnaké hranice a farebná kompozícia tried, pokiaľ má mať grafické porovnanie rovnaký význam.

Chýbajúce údaje, nízka dátová podpora a zvýšená neistota sa nesmú graficky zamaskovať. Plochy bez údajov majú samostatný symbol; podľa účelu možno zobraziť prekrývajúcu vrstvu dátovej podpory alebo neistoty.

Generalizovaný mapový produkt je nový odvodený výstup. Musí mať vlastné metadáta, identifikovanú metódu generalizácie a nesmie nahradiť pôvodnú detailnú analytickú vrstvu. Pri spojitých údajoch sa generalizácia vykonáva odbornou agregáciou, pri kategorizovaných údajoch dominantnou triedou alebo plošnými podielmi a pri líniiach geometrickým zjednodušením s kontrolovanou toleranciou.

4.11. Možnosti aktualizácie a ďalšieho rozvoja geodatabázy

Geodatabáza sa navrhuje ako verziovaný a aktualizovateľný systém. Aktualizácia nespočíva v prepisovaní existujúcich hodnôt, ale vo vytvorení novej verzie príslušného záznamu alebo vrstvy. Staršia

analytická verzia zostáva archivovaná tak, aby bolo možné spätne rekonštruovať stav údajov k určitému obdobiu.

Aktualizácia môže byť časovo plánovaná alebo vyvolaná udalosťou. Ťažba, vetrová alebo podkôrniková kalamita, požiar, rozsiahle odumieranie, zmena hospodárskeho režimu, výstavba alebo významný preventívny zásah majú aktivovať kontrolu platnosti dotknutých palivových vrstiev. Udalosť sama osebe neznamena automatické priradenie novej palivovej triedy; určuje potrebu opätovného posúdenia.

Relatívne stabilné štruktúrne parametre a dynamické stavové údaje majú odlišný aktualizčný režim. Typ paliva alebo korunová štruktúra môžu zostať platné dlhšie obdobie, zatiaľ čo vlhkosť jemného odumretého paliva môže vyžadovať aktualizáciu v hodinovej alebo dennej mierke. Aktualizačný interval je preto vlastnosťou konkrétneho parametra alebo vrstvy, nie celej geodatabázy.

Ďalší rozvoj môže zahŕňať nové terénne merania, nové cykly laserového skenovania, multispektrálne a radarové produkty, senzorové údaje, nové biometrické modely a aktualizované klasifikačné systémy. Ich pridanie nesmie narušiť význam existujúcich kódov a staršie verzie musia zostať interpretovateľné prostredníctvom dátového slovníka a metadát.

Základným princípom dlhodobého rozvoja je oddelenie fyzikálne interpretovateľného palivového profilu od konkrétneho palivového modelu alebo hodnotiaceho indexu. Vďaka tomu možno rovnaké zdrojové a referenčné údaje opakovane využiť aj po zmene modelovacieho systému alebo metodiky hodnotenia požiarneho rizika.

Takto navrhnutá geodatabáza predstavuje metodický most medzi terénnym zisťovaním, priestorovým mapovaním, tvorbou palivových modelov a následným hodnotením požiarneho nebezpečenstva a rizika. Jej odborná hodnota spočíva najmä v transparentnosti dátového toku, zachovaní pôvodu údajov, reprodukovateľnosti odvodení a možnosti bezpečne aktualizovať výsledky bez straty pôvodnej informácie. Odporúčané spúšťače aktualizácie a režimy ich uplatnenia sú uvedené v tabuľke 24.

Tabuľka 24 Odporúčané spúšťače a režimy aktualizácie

Spúšťač	Dotknuté údaje	Odporúčaný režim
Pravidelná revízia	porastové a štruktúrne údaje	podľa dostupnosti nového referenčného zdroja alebo cyklu mapovania
Dynamická aktualizácia	vlhkosť a iné stavové veličiny	hodiny až dni podľa zdroja a účelu
Ťažba alebo pestovateľský zásah	povrchové, rebríkové a korunové vrstvy	kontrola platnosti bezprostredne po evidovaní zásahu
Kalamita alebo rozsiahle poškodenie	štruktúra palivového komplexu	prioritné opätovné mapovanie dotknutého územia
Požiar	všetky palivové vrstvy v zasiahnutom území	nová verzia po udalosti; oddelenie stavu pred a po požiari
Nový model alebo klasifikačné pravidlo	odvodené triedy a modely	prepočet z pôvodných zachovaných parametrov bez prepisu zdrojových dát

5. PRIESTOROVÉ ODVODENIE A HODNOTENIE POVRCHOVÉHO PALIVA V LESOCH SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Povrchové palivo tvorí časť palivového komplexu bezprostredne viazanú na povrch pôdy a spodné vrstvy vegetácie. V metodike tejto monografie sa neposudzuje ako jedna súhrnná veličina, ale ako súbor fyzikálne, štruktúrne a funkčne odlišných komponentov. Patria sem najmä opad, hrabanka, jemné odumreté palivo, živá a odumretá bylinná vegetácia, kroviny a ležiace drevo. Význam jednotlivých zložiek sa mení podľa ich veľkosti, množstva, priestorového usporiadania, stupňa rozkladu a vlhkosti. Z hľadiska mapovania je preto potrebné zachovať samostatné informácie o jednotlivých komponentoch a nevytvárať jednu univerzálnu hodnotu povrchového paliva.

Priestorové odvodenie povrchového paliva nadväzuje na metodický rámec mapovania uvedený v kapitole 2, na terénne zisťovanie podľa kapitoly 3 a na geodatabázovú architektúru kapitoly 4. Terénne merania vytvárajú referenčný základ, ale ich priestorový rozsah je obmedzený. Priestorovo súvislý výstup preto vzniká až prepojením referenčných meraní s vhodnými lesníckymi, topografickými, environmentálnymi a diaľkovo snímanými vysvetľujúcimi údajmi. Takto odvodená mapa predstavuje modelovaný priestorový produkt a nesmie sa interpretovať ako priame meranie každej rastrovej bunky.

Predchádzajúci slovenský metodický výstup autorov preukázal možnosť priestorového mapovania povrchového lesného paliva na celoštátnej úrovni (Majlingová, Sedliak a Smreček, 2018). V tejto monografii sa uvedený prístup rozširuje o explicitné rozlíšenie jednotlivých palivových komponentov, ich priestorovej podpory, pôvodu hodnoty, modelového odvodenia, dátovej podpory a neistoty. Cieľom kapitoly nie je prezentovať jednu nemennú mapu povrchového paliva Slovenska, ale definovať opakovateľný postup, podľa ktorého možno priestorové vrstvy vytvárať a aktualizovať pri dostupnosti nových údajov.

Metodika vychádza zo zásady, že priestorová klasifikácia paliva nemá predchádzať kvantifikácii základných fyzikálnych a štruktúrnych parametrov. Palivový typ alebo palivový model je odvodenou interpretáciou palivového profilu. Základná databáza preto musí zachovať množstvo jednotlivých zložiek, hĺbku palivového lôžka, pokryvnosť, horizontálnu kontinuitu a ďalšie merané alebo modelované charakteristiky aj po ich neskoršom zaradení do kategórií. Takýto postup je v súlade so všeobecnou požiadavkou, aby mapovanie paliva rešpektovalo jeho heterogenitu a účel použitia (Keane, 2013; Keane, 2015).

5.1. Východiská priestorového hodnotenia povrchového paliva

Priestorové hodnotenie povrchového paliva sa zakladá na funkčnom rozdelení jeho zložiek. Samostatne sa posudzuje jemné odumreté palivo, bylinná zložka, krovinné palivo, opad, hrabanka a ležiace drevo podľa definovaných veľkostných kategórií. Toto členenie je potrebné zachovať aj vtedy, keď sa pre následné modelovanie používajú súhrnné veličiny. Rovnaké celkové množstvo paliva môže byť vytvorené rozdielnym pomerom jemných a hrubých zložiek a z hľadiska iniciácie, rýchlosti povrchového šírenia, intenzity a trvania horenia preto nemusí mať rovnaký význam.

Povrchové palivo je priestorovo heterogénne aj v rámci jedného porastu. Rozdiely vznikajú ukladaním opadu, vetrom premiestňovaným materiálom, nerovnomerným výskytom bylín a krovín, lokálnym odumieraním, ťažbovými zvyškami, kalamitami, rozkladom a mikrorelieфом. Priestorový model nesmie

túto heterogenitu automaticky vyhladiť len preto, že pracuje s jednotnou rastrovou mriežkou. Pri každej výslednej vrstve sa preto zachová informácia o pôvodnej priestorovej podpore vstupu a o tom, či hodnota vznikla meraním, agregáciou alebo predikciou.

Priestorové mapovanie povrchového paliva nemožno založiť iba na dominantnej drevine alebo na kategórii lesného porastu. Takéto údaje môžu byť významnými vysvetľujúcimi premennými, ale vzťah ku konkrétnemu palivovému parametru sa musí preukázať referenčnými meraniami. Aj súčasné európske systémy mapovania paliva zdôrazňujú potrebu hierarchickej klasifikácie a kombinovania viacerých zdrojov údajov, pričom výsledná použiteľnosť závisí od účelu a priestorovej mierky produktu (Aragoneses et al., 2023).

Základné parametre povrchového paliva, ktoré vstupujú do priestorového odvodenia, sú zhrnuté v tabuľke 25. Tabuľka nerozdeľuje parametre podľa dostupnosti konkrétneho softvéru alebo dátového produktu, ale podľa ich odborného významu v palivovom profile.

Tabuľka 25 Základné parametre povrchového paliva pre priestorové odvodenie

Parameter	Kód	Typ hodnoty	Jednotka	Priestorový význam
Typ povrchového paliva	typ_povrch	kategória	kód	opis dominantnej štruktúry povrchovej vrstvy
Dominantný nositeľ šírenia	nositel_sir	kategória	kód	zložka vytvárajúca pravdepodobnú cestu povrchového šírenia
Množstvo jemného odumretého paliva	mnoz_jem	spojitá	kg·m ⁻²	iniciačne a šírením významná jemná frakcia
Množstvo bylinného paliva	mnoz_byl	spojitá	kg·m ⁻²	živá a odumretá bylinná zložka
Množstvo krovínového paliva	mnoz_krov	spojitá	kg·m ⁻²	krovinová biomasa v povrchovej alebo prechodovej vrstve
Množstvo ležiaceho dreva	mnoz_drevo	spojitá	kg·m ⁻² / t·ha ⁻¹ / m ³ ·ha ⁻¹	drevný materiál podľa veľkostných tried a rozkladu
Hĺbka palivového lôžka	hlb_lozko	spojitá	m alebo cm	zvislý rozsah funkčnej povrchovej vrstvy
Pokryvnosť povrchových zložiek	pokryv_pov	spojitá	%	plošné zastúpenie jednotlivých zložiek
Horizontálna kontinuita	spojit_pov	kategória / index	kód alebo bezrozmerné	plošné prepojenie dominantného nositeľa šírenia
Vlhkosť jemného paliva	vlhk_jem	spojitá, dynamická	%	časovo premenlivý stav dostupnosti jemného paliva

5.2. Palivový profil povrchovej vrstvy ako základ priestorového odvodenia

Základnou referenčnou jednotkou priestorového odvodenia je palivový profil terénnej plochy. Profil zachováva pôvodné terénne merania a ich väzbu na konkrétnu lokalitu, čas a priestorovú podporu. Pre povrchovú vrstvu obsahuje najmenej typ paliva, dominantný nositeľ šírenia, množstvo jednotlivých zložiek, hĺbku opadu a hrabanky, hĺbku palivového lôžka, pokryvnosť a horizontálnu kontinuitu. Pri dynamických parametroch sa k hodnote pripája dátum a čas merania.

Jednotlivé merania nemajú rovnakú priestorovú podporu. Odberový rámec reprezentuje malú plochu, transekt poskytuje líniový odhad ležiaceho dreva a terénny opis celej referenčnej plochy charakterizuje

širšie usporiadanie paliva. Vnorené merania sa preto najskôr uchovávajú samostatne a až následne sa agregujú na úroveň, ktorá zodpovedá modelovanému parametru. Agregáčny postup musí byť pri každom parametri definovaný a zaznamenaný v metadátach.

Pracovná bunka 10 × 10 m predstavuje spoločný technický nosič priestorových vrstiev. Neznamená však, že každá hodnota je priamo meraná alebo informačne podrobná na úrovni plochy s veľkosťou 100 m². Ak bola hodnota odvodená z hrubšieho vstupu, z väčšej referenčnej plochy alebo z modelu kalibrovaného na širšom priestorovom rozsahu, táto skutočnosť sa musí zachovať v atribúte pôvodu, dátovej podpore alebo metadátach.

Priestorové odvodenie začína kontrolou, či terénna veličina a vysvetľujúce priestorové premenné opisujú rovnaký jav. Spektrálny index, drevinové zloženie alebo zakmenenie nie sú náhradou množstva povrchového paliva. Môžu však vstupovať do modelu ako vysvetľujúce premenné, ak sa ich vzťah k terénne zistenému parametru preukáže na kalibračnom súbore. Prehľad diaľkového prieskumu lesného paliva upozorňuje, že pozorovateľnosť palivových charakteristík sa výrazne líši podľa senzora, vegetačnej vrstvy a prostredia (Abdollahi a Yebra, 2023).

5.3. Priestorové odvodenie množstva povrchového paliva

Základom priestorového odvodenia množstva povrchového paliva je jeho kvantifikácia na referenčných terénnych plochách. Množstvo paliva sa stanovuje samostatne pre jednotlivé palivové zložky, pretože jemné odumreté palivo, bylinná a krovinná biomasa, opad, hrabanka a ležiace drevo majú rozdielne fyzikálne vlastnosti, priestorové usporiadanie a význam pri iniciácii a ďalšom priebehu horenia. Primárnym referenčným údajom je množstvo suchej hmoty príslušnej palivovej zložky vzťahnuté na známu pôdorysnú plochu. Takto získaná hodnota vytvára základ na porovnávanie terénnych plôch, kalibráciu priestorových modelov a následné odvodenie súvislých rastrových vrstiev.

Pri plošnom odbere sa množstvo paliva určí z hmotnosti vzorky po vysušení na konštantnú hmotnosť a z veľkosti plochy, z ktorej bola vzorka odobratá. Výpočet sa vykonáva osobitne pre každú hodnotenú palivovú zložku podľa vzťahu (50):

$$w = \frac{m_s}{A} \quad (50)$$

kde

w – množstvo paliva (kg·m⁻²)

m_s – suchá hmotnosť odobratej palivovej zložky (kg)

A – plocha odberu (m²)

Hodnota sa vždy vzťahuje na konkrétnu zložku paliva a nesmie sa bez uvedenia skladby interpretovať ako univerzálna charakteristika celého povrchového palivového komplexu.

Terénne zistené množstvo paliva sa nepovažuje automaticky za hodnotu celej rastrovej bunky, JPRL alebo inej mapovej jednotky. Predstavuje referenčné pozorovanie, ktoré možno použiť pri charakterizácii lokality, kalibrácii priestorového modelu alebo nezávislom overení výslednej vrstvy. Priestorový odhad sa vytvára až po prepojení referenčných údajov s vysvetľujúcimi premennými.

Na vytvorenie priestorovo súvislej vrstvy množstva paliva je potrebné prepojiť referenčné terénne hodnoty s priestorovými vysvetľujúcimi premennými, ktoré sú dostupné pre celé hodnotené územie. Výber týchto

premenných sa vykonáva osobitne pre každú palivovú zložku a musí vychádzať z preukázaného vzťahu k terénne zistenému množstvu paliva. Priestorový odhad sa potom určuje pomocou kalibrovaného modelového vzťahu, ktorý možno všeobecne zapísať podľa vzťahu (51):

$$\hat{w}_k(s) = f_k[X_1(s), X_2(s), \dots, X_p(s)] \quad (51)$$

kde

$\hat{w}_k(s)$ – odhad množstva palivovej zložky v polohe s

f_k – kalibrovaný modelový vzťah pre palivovú zložku k

$X_1(s), X_2(s), \dots, X_p(s)$ – vysvetľujúce priestorové premenné v polohe

Vzťah (51) predstavuje všeobecný metodický rámec, nie predpis jedného konkrétneho algoritmu. Forma modelu sa volí podľa charakteru hodnoteného parametra, množstva a priestorového rozloženia referenčných údajov, charakteru vzťahov medzi premennými a požadovanej prenositeľnosti výsledku. Možno použiť štatistické regresné modely, stromové alebo iné algoritmy strojového učenia, ak je ich použitie odborne zdôvodnené, overené na údajoch nepoužitých pri kalibrácii a výsledok zostáva interpretovateľný. Priestorová úspešnosť modelu sa nesmie posudzovať iba podľa chyby na kalibračných údajoch.

Priestorové modely sa vytvárajú samostatne pre parametre, ktoré majú rozdielny fyzikálny význam. Zlúčenie jemného odumretého paliva, bylinného paliva, krovinej biomasy a ležiaceho dreva do jednej predikovanej veličiny je prípustné iba ako dodatočný súhrnný výstup, pričom základné komponenty musia zostať dostupné samostatne.

5.4. Priestorové odvodenie jednotlivých zložiek povrchového paliva

Jemné odumreté palivo sa priestorovo hodnotí samostatne, pretože jeho krátka vlhkostná odozva a bezprostredný kontakt s potenciálnym iniciačným zdrojom mu dávajú osobitné postavenie pri vzniku a počiatkoch šírení požiaru. Referenčná hodnota sa získava plošným terénnym odberom alebo iným štandardizovaným postupom definovaným v kapitole 3. Priestorový model môže využívať kombináciu porastových, stanovištných, topografických a diaľkovo snímaných premenných, ale výsledok sa vedie ako modelovaný odhad „mnoz_jem“, nie ako priamo meraná hodnota.

Bylinné palivo sa vedie minimálne s rozlíšením živej a odumretej zložky. Priestorové odvodenie musí zohľadniť, že bylinná biomasa a jej dostupnosť pre horenie sa menia sezónne. Statická vrstva množstva bylinného paliva sa preto nesmie zamieňať s dynamickou vrstvou jeho vlhkosti ani s fenologickým stavom. Ak sa vytvára sezónna mapa, referenčné údaje a vysvetľujúce premenné sa musia viazať na porovnateľné obdobie.

Krovinové palivo môže mať povrchovú aj rebríkovú funkciu. Pri priestorovom spracovaní sa preto množstvo krovinej biomasy nesmie interpretovať bez súčasnej informácie o jej výške a vertikálnom kontakte s ďalšími palivovými vrstvami. Hodnota „mnoz_krov“ opisuje množstvo, kým funkčné zaradenie do povrchového alebo rebríkového paliva sa odvodzuje z priestorovej štruktúry.

Ležiace drevo sa kvantifikuje podľa veľkostných kategórií a stupňa rozkladu. Planárna priesečníková metóda a jej odvodené postupy predstavujú štandardný základ inventarizácie ležiaceho dreveného materiálu a umožňujú odhadovať jeho hmotnosť alebo objem z transektových meraní (Brown, 1974).

Pri priestorovej vrstve sa musí evidovať, či výsledok vyjadruje hmotnosť, objem alebo inú odvodenú charakteristiku; tieto jednotky sa nesmú zamieňať.

Odporúčané funkčné väzby medzi jednotlivými zložkami povrchového paliva, referenčnými údajmi a priestorovými vysvetľujúcimi premennými sú uvedené v tabuľke 26.

Tabuľka 26 Odporúčané väzby pri priestorovom odvodení povrchových palivových zložiek

Palivová zložka	Referenčný zdroj	Možné vysvetľujúce premenné	Kľúčové obmedzenie
Jemné odumreté palivo	plošný odber	drevinové zloženie, zápoj, typologické údaje, reliéf, porastové zmeny	pod zapojenými korunami je z nadkorunových senzorov pozorované prevažne nepriamo
Bylinné palivo	plošný odber a terénny opis	pokryvnosť, spektrálne ukazovatele, fenológia, svetelné podmienky	silná sezónna dynamika
Krovinové palivo	plošný odber / alometria / profil	výška vegetácie, pokryvnosť, LiDAR, obrazová analýza	funkcia závisí od výšky a vertikálneho spojenia
Opad a hrabanka	odber a meranie hĺbky	drevinové zloženie, stanovište, mikoreliéf, zápoj	„nadkorunové“ DPZ ich nezachytáva priamo
Ležiace drevo	transektové meranie	porastový stav, disturbancia, ťažba, LiDAR pri vhodných dátach	veľkostná trieda a rozklad musia zostať rozlíšené

5.5. Opad, hrabanka a ležiace drevo v priestorovom hodnotení

Opad a hrabanka sa v priestorovom hodnotení vedú oddelene. Opad predstavuje povrchovú vrstvu relatívne málo rozloženého organického materiálu, zatiaľ čo hrabanka predstavuje hlbšiu, čiastočne rozloženú organickú vrstvu. Ich hranica musí byť v terénnom protokole definovaná jednotným pravidlom. Pri oboch zložkách sa podľa účelu zaznamenáva hĺbka, množstvo suchej hmoty, pokryvnosť a vlhkosť.

Priestorové odvodenie opadu a hrabanky je metodicky náročné, pretože ich vlastnosti sú pod zapojeným korunovým zápojom, získané z optických údajov zaznamenaných pri zalietaní a zosnímaní nad korunami stromov, pozorovateľné iba nepriamo. Lesnícke a typologické údaje môžu pomôcť pri stratifikácii, ale nemajú nahradiť referenčné meranie. Priestorový model musí byť preto formulovaný ako predikcia založená na kalibrovanom vzťahu a nie ako priame prečítanie stavu povrchovej vrstvy zo spektrálneho obrazu.

Ležiace drevo sa od opadu a hrabanky oddeľuje vzhľadom na rozdielnu veľkostnú štruktúru, spôsob inventarizácie a požiarnu funkciu. Pôvodná transektová informácia sa v geodatabáze zachováva samostatne; agregovaná hodnota pre rastrovú bunku alebo JPRL vzniká až definovaným výpočtom. Brown (1974) rozlišuje pri planárnom priesečníkovom inventarizačnom postupe viacero priemerových tried ležiaceho materiálu, čo podporuje zásadu nezlučovať celý drevný komponent do jednej nediferencovanej veličiny.

Pri vytváraní súhrnného množstva povrchového paliva možno jednotlivé hmotnostné komponenty sčítat iba vtedy, ak sú vyjadrené na rovnakej plošnej báze a v porovnateľnej jednotke suchej hmotnosti. Súhrnná hodnota sa vedie ako odvodený parameter a základné komponenty zostávajú zachované. V prípade

objemovo vyjadreného ležiaceho dreva sa prevod na hmotnosť vykonáva iba prostredníctvom zdokumentovaného vzťahu zohľadňujúceho vlastnosti materiálu a jeho stav.

5.6. Vzťah porastovej štruktúry a povrchového paliva

Porastová štruktúra ovplyvňuje produkciu, akumuláciu, rozklad a mikroklimatické podmienky povrchového paliva, avšak porastový atribút sám osebe nie je palivovým parametrom. Drevinové zloženie, vek, vývojové štádium, zakmenenie, zápoj, hospodárske zásahy a zdravotný stav možno použiť ako stratifikačné alebo vysvetľujúce premenné. Ich vzťah ku konkrétnemu množstvu alebo štruktúre paliva sa musí overiť na referenčných údajoch.

Priestorové modelovanie má zabrániť deterministickému priradovaniu jednej hodnoty množstva paliva všetkým porastom rovnakej dreviny alebo vekovej triedy. Aj v rámci rovnakého lesníckeho typu môžu vzniknúť rozdiely vplyvom lokálneho opadu, podrastu, poškodenia, predchádzajúceho manažmentu alebo mikroreliefu. Vhodnejšie je preto modelovať spojitú veličinu alebo pravdepodobnosť príslušnosti k palivovému typu na základe kombinácie viacerých premenných.

Pri udalostiach, ktoré významne menia porastovú štruktúru, sa existujúca vrstva povrchového paliva nepremení automaticky na novú triedu. Ťažba, vetrová alebo podkôrniková kalamita, požiar a iné disturbance sa používajú ako spúšťače kontroly platnosti. Podľa dostupných údajov sa vykoná nové meranie, obrazová interpretácia alebo modelový prepočet, pričom pôvodná verzia zostáva archivovaná.

Skupiny priestorových premenných, ktoré možno pri modelovaní povrchového paliva uvažovať, sú uvedené v tabuľke 27. Tabuľka nepredstavuje povinný zoznam vstupov; konkrétny výber musí byť podložený dostupnosťou, kvalitou a preukázanou väzbou ku konkrétnemu palivovému parametru.

Tabuľka 27 Skupiny vysvetľujúcich premenných pri priestorovom odvodení povrchového paliva

Skupina	Príklady premenných	Úloha v modeli	Hlavné upozornenie
Lesnícke	drevinové zloženie, vek, zakmenenie, vývojové štádium, zásahy	stratifikácia a vysvetlenie porastového kontextu	nejde o priamu mieru paliva
Typologické a stanovištné	HSLT/SLT, pôdne a stanovištné charakteristiky	stratifikácia podmienok akumulácie a rozkladu	vzťah k palivu musí byť overený
Topografické	nadmorská výška, sklon, orientácia, topografická poloha	mikroklimatický a priestorový kontext	relieф nie je palivová veličina
Optické DPZ	spektrálne pásma, vegetačné indexy, fenologické ukazovatele	stav vegetácie a zmeny povrchu	pod korunou je povrchové palivo pozorované prevažne nepriamo
LiDAR	výškové metriky, medzery, hustota návratov	štruktúra podrastu a porastový kontext	hmotnosť paliva sa neurčuje priamo z geometrie
Udalosti a manažment	ťažba, kalamita, požiar, obnova	aktualizácia a vysvetlenie zmien	udalosť sama neurčuje novú palivovú hodnotu

5.7. Priestorová variabilita a heterogenita povrchového paliva

Priestorová variabilita povrchového paliva sa hodnotí na viacerých úrovniach. Na najnižšej úrovni ide o rozdiely medzi vnorenými odbermi jednej referenčnej plochy; vyššie úrovne predstavujú rozdiely medzi

plochami rovnakého stratum, medzi JPRL a medzi širšími regiónmi. Tieto zdroje variability sa nemajú automaticky zlúčiť do jednej miery, pretože každý z nich opisuje inú časť priestorovej štruktúry.

Pri spojitých parametroch sa spolu s charakteristickou hodnotou odporúča vyjadriť aj mieru variability (52) a dátové pokrytie. Priemer je vhodný pre niektoré aditívne veličiny, pri silne asymetrickom rozdelení môže byť informatívnejší medián. Horný kvantil možno použiť ako doplnkovú informáciu tam, kde je odborne významná lokálna koncentrácia paliva. Maximálna hodnota sa nepoužíva automaticky, pretože môže byť citlivá na chybný alebo nereprezentatívny záznam.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (52)$$

kde

CV – variačný koeficient (%)

s – smerodajná odchýlka

$\bar{x}$ – aritmetický priemer

Variačný koeficient sa nepoužíva pri priemere blízkom nule a jeho význam sa interpretuje spolu s počtom meraní a rozsahom hodnôt.

Pri kategorizovaných palivových vrstvách je heterogenita lepšie zachovaná plošnými podielmi jednotlivých tried než samotnou dominantnou triedou. Dominantná trieda je praktickým súhrnom pre JPRL alebo inú územnú jednotku, ale nemá zakrývať významnú menšinovú palivovú zložku, ktorá môže vytvárať súvislý koridor povrchového šírenia.

Extrémne alebo priestorovo izolované hodnoty sa automaticky neodstraňujú. Najskôr sa preveria voči pôvodnému terénnemu záznamu, fotografii, susedným meraniam a dostupným priestorovým podkladom. Skutočný lokálny zhuk paliva je odbornou informáciou, nie chybou, a jeho vyhladenie by mohlo znížovať použiteľnosť mapy.

5.8. Hodnotenie potenciálu povrchového šírenia požiaru

Priestorové vrstvy povrchového paliva možno použiť na identifikáciu území s vyššou štruktúrou predispozíciou na povrchové šírenie požiaru. Takýto výstup však nemožno označiť za aktuálne požiarne nebezpečenstvo ani za požiarne riziko. Predstavuje iba palivovú charakteristiku, ktorá musí byť pri operačnom hodnotení kombinovaná s dynamickými meteorologickými podmienkami, vlhkosťou paliva, reliéfom a podľa účelu aj s informáciou o iniciačných zdrojoch.

Pri hodnotení povrchového šírenia sa sleduje najmä prítomnosť a množstvo jemného paliva, dominantný nositeľ šírenia, horizontálna kontinuita a hĺbka palivového lôžka. Množstvo hrubého ležiaceho dreva môže významne ovplyvňovať trvanie horenia a tepelný účinok, ale samo osebe nemusí predstavovať vysoký potenciál rýchleho počiatočného šírenia. Preto sa jednotlivé komponenty nemajú bez fyzikálneho zdôvodnenia kompenzovať v jednom jednoduchom súčtovom indexe.

Ak sa pre praktický účel vytvorí syntetická trieda predispozície na povrchové šírenie, musí byť odvodená z explicitne definovaných pravidiel. Vstupné parametre, prahy, prípadné váhy a verzia pravidla sa evidujú v geodatabáze. Základné spojité a kategorizované palivové vrstvy zostávajú zachované a syntetická trieda predstavuje iba odvodený interpretačný produkt.

Vlhkosť jemného odumretého paliva sa do statickej štruktúrnej vrstvy nevkladá ako nemenný atribút. Vede sa samostatne ako časovo viazaná dynamická vrstva. Rovnaký priestorový palivový profil tak môže v rôznych dňoch alebo obdobiach nadobúdať rozdielny význam pre aktuálne správanie požiaru.

5.9. Tvorba, agregácia a aktualizácia mapových výstupov povrchového paliva

Výsledkom priestorového odvedenia nie je jedna mapa, ale súbor vzájomne prepojených vrstiev. Základné výstupy zahŕňajú typ povrchového paliva, dominantný nositeľ šírenia, množstvo jemného, bylinného a krovinného paliva, množstvo ležiaceho dreva, hĺbku palivového lôžka, pokryvnosť a horizontálnu kontinuitu. Podľa účelu možno vytvoriť aj odvodenú vrstvu objemovej hustoty palivového lôžka alebo súhrnného množstva povrchového paliva.

Pri každej vrstve sa zachováva kód parametra podľa dátového slovníka, jednotka, typ hodnoty, zdroj, spôsob odvedenia, verzia modelu alebo pravidla, referenčné obdobie, dátová podpora a neistota. Modelovaná vrstva sa nesmie označovať rovnakým spôsobom ako priamo meraný referenčný údaj bez atribútu pôvodu.

Pri agregácii rastrových výstupov na JPRL alebo inú územnú jednotku sa agregáčne pravidlo vyberá podľa odborného významu parametra. Pri kategóriách sa uvádza dominantná trieda a plošné podiely, pri spojitých parametroch priemer alebo medián a vhodná miera variability. Dátové pokrytie jednotky sa eviduje samostatne, aby sa rovnaká súhrnná hodnota neinterpretovala rovnako pri úplnom a pri neúplnom pokrytí.

Odporúčané pravidlá agregácie sú uvedené v tabuľke 28.

Tabuľka 28 Odporúčané pravidlá agregácie povrchových palivových vrstiev

Typ parametra	Primárny súhrn	Doplňkový údaj	Nevhodný automatický postup
Kategorizovaný palivový typ	dominantná trieda	plošné podiely tried	ponechať iba dominantnú triedu bez informácie o heterogenite
Množstvo paliva	priemer alebo medián podľa rozdelenia	variabilita, počet platných buniek, prípadne horný kvantil	použiť maximum ako reprezentatívnu hodnotu celej jednotky
Hĺbka palivového lôžka	priemer / medián	rozsah alebo variabilita	zamieňať hĺbku rôznych funkčných vrstiev
Pokryvnosť	plošne vážený priemer	variabilita	sčítat' prekrývajúce sa vrstvy ako keby tvorili jednu plochu
Horizontálna kontinuita	odvodený index / trieda podľa pravidla	podiel súvislých plôch, veľkosť medzier	nahradiť kontinuitu iba priemernou pokryvnosťou

Aktualizácia povrchových vrstiev sa riadi časovou stabilitou parametra a výskytom udalostí. Relatívne stabilné štruktúrne charakteristiky možno aktualizovať podľa dostupnosti nového mapovania alebo referenčných údajov. Ťažba, kalamita, požiar, rozsiahle poškodenie alebo výrazná zmena podrastu predstavujú spúšťač kontroly platnosti vrstvy. Dynamická vlhkosť sa aktualizuje v podstatne kratšom časovom režime.

Nová verzia vrstvy nesmie prepísať pôvodný analytický produkt. Geodatabáza uchováva dátum platnosti, dátum spracovania a väzbu na vstupné verzie. Takýto postup umožňuje vytvárať časové porovnania bez zámeny skutočnej zmeny paliva so zmenou metodiky alebo zdrojového produktu.

5.10. Interpretácia, neistota a obmedzenia použitia

Mapy povrchového paliva sa interpretujú iba v rozsahu významu konkrétneho parametra. Vysoké celkové množstvo paliva samo osebe neznamena vysoké nebezpečenstvo vzniku požiaru. Pre iniciáciu je významná najmä prítomnosť dostupného jemného paliva, jeho aktuálna vlhkosť a iniciálny zdroj. Pre rýchlosť povrchového šírenia je dôležitá aj kontinuita palivovej vrstvy, vietor a sklon. Hrubšie drevné palivo môže mať väčší význam pre trvanie horenia a tepelný účinok než pre rýchlosť počiatočného šírenia.

Z praktického hľadiska je preto potrebné rozlišovať mapu povrchového paliva, odvodenú mapu štruktúrnej predispozície na povrchové šírenie, mapu náchylnosti na vznik požiaru a časovo premenlivú mapu požiarneho nebezpečenstva. Tieto produkty opisujú rozdielne procesy a nemajú sa nahrádzať jedným všeobecným rastrom „palivového rizika“.

Neistota pri priestorovom odvodení vzniká z viacerých zdrojov: z prirodzenej heterogenity paliva, obmedzeného počtu terénnych meraní, rozdielnej priestorovej podpory, polohovej chyby, časového nesúladu, obmedzenej pozorovateľnosti povrchových vrstiev, modelového vzťahu a prípadnej extrapolácie mimo kalibračného rozsahu. Tieto zdroje sa majú podľa možností evidovať samostatne a nie bez zdôvodnenia zlúčiť do jediného čísla.

Priestorový model sa prednostne používa v rozsahu podmienok reprezentovaných kalibračnými údajmi. Predikcie pre kombinácie vstupných premenných mimo alebo na okraji kalibračného rozsahu sa označujú nižšou dátovou podporou alebo zvýšenou neistotou. Jemná veľkosť výstupnej bunky nesmie vytvárať dojem vyššej presnosti, než akú podporujú pôvodné údaje.

Pri mapovaní na celoštátnej úrovni je potrebné akceptovať kompromis medzi rozsahom, tematickou podrobnosťou a hustotou referenčných údajov. Predchádzajúca slovenská práca autorov poskytla základ pre priestorové mapovanie povrchového paliva na národnej úrovni (Majlingová, Sedliak a Smreček, 2018), súčasná metodika však zdôrazňuje, že národná vrstva nemá nahrádzať detailné lokálne zisťovanie pri rozhodnutiach vyžadujúcich vysokú priestorovú presnosť.

Odporúčaný súbor finálnych výstupov tejto kapitoly je uvedený v tabuľke 29. Primárne analytické vrstvy majú zostať oddelené od odvodených interpretačných produktov.

Tabuľka 29 Odporúčaný súbor výstupov priestorového hodnotenia povrchového paliva

Skupina	Výstup	Charakter	Hlavné využitie
Základná klasifikácia	typ_povrch, nositel_sir	kategorizovaný	opis palivového profilu a funkcie dominantnej zložky
Množstvo	mnoz_jem, mnoz_byl, mnoz_krov, mnoz_drevo	spojitý	kvantifikácia jednotlivých palivových komponentov
Štruktúra	hlb_lozko, pokryv_pov, spojit_pov	spojitý / kategorizovaný	opis usporiadania a potenciálu povrchového šírenia
Dynamický stav	vlhk_jem a ďalšie časovo viazané vlhkosti	spojitý, časový	aktuálna dostupnosť paliva pre horenie
Ovodená interpretácia	palivový typ, palivový model alebo trieda predispozície	odvodený	modelovanie alebo konkrétny hodnotiaci rámec
Podpora a neistota	povod_udaja, podpora_dat, neistota	atribút / pomocná vrstva	interpretácia spoľahlivosti a obmedzení

Priestorové hodnotenie povrchového paliva sa tým uzatvára ako postup, ktorý transformuje referenčné terénne merania na priestorovo súvislé, verziované a interpretovateľné vrstvy. Metodická hodnota výsledku spočíva v zachovaní fyzikálneho významu parametrov, ich pôvodu a neistoty, nie v samotnej grafickej podobe mapy. Takto pripravené povrchové vrstvy tvoria jeden zo vstupov pre kapitolu o rebríkovom a korunovom palive, tvorbu palivových modelov a následné hodnotenie nebezpečenstva vzniku požiaru a rizika vzniku požiaru.

6. PRIESTOROVÉ ODVODENIE A HODNOTENIE REBRÍKOVÉHO A KORUNOVÉHO PALIVA V LESOCH SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Rebríkové a korunové palivo predstavujú vertikálne nadväzujúce časti lesného palivového komplexu. Ich význam sa neviaže iba na množstvo biomasy, ale najmä na jej polohu, vertikálnu kontinuitu, priestorové rozloženie a dostupnosť jemných palivových častí. Rebríkové palivo vytvára funkčné spojenie medzi povrchovou vrstvou a korunovou zónou; korunové palivo následne určuje, aký objem jemnej biomasy je v korunách dostupný pre horenie a či je v priestore dostatočne súvislý na ďalšie šírenie požiaru.

Metodika nadväzuje na terénne zisťovanie podľa kapitoly 3 a na geodatabázovú architektúru kapitoly 4. Základné fyzikálne a štruktúrne parametre sa najskôr uchováajú samostatne a až následne sa používajú pri odvodení palivových tried, modelových vstupov alebo ukazovateľov vertikálneho potenciálu. Pri každej hodnote sa zachováva informácia o tom, či bola priamo meraná, odvodená z biometrických údajov, vypočítaná z lidarových metrík alebo modelovaná z viacerých priestorových vstupov.

Cieľom kapitoly nie je prezentovať jednu definitívnu mapu rebríkového alebo korunového paliva Slovenska. Predmetom je prezentovať opakovateľný postup na priestorové odvodenie a hodnotenie výšky korunovej bázy, hĺbky koruny, plošného množstva korunového paliva, objemovej hustoty korunového paliva, korunovej pokrývnosti, horizontálnej kontinuity korún a parametrov vertikálneho prepojenia paliva. Takto vytvorené vrstvy tvoria základ pre následnú tvorbu palivových modelov a hodnotenie podmienok prechodu povrchového požiaru do vyšších vrstiev.

6.1. Východiská hodnotenia vertikálneho palivového profilu

Vertikálny palivový profil sa chápe ako priestorové usporiadanie horľavej biomasy od povrchu pôdy po hornú hranicu korunovej vrstvy. Pre potreby mapovania sa člení najmenej na povrchové, rebríkové a korunové palivo. Toto členenie nie je iba opisné. Každá vrstva má rozdielnu úlohu pri prenose tepla, iniciácii vyššie položenej biomasy a ďalšom šírení požiaru.

Rebríkové palivo nemožno definovať iba druhovým zložením alebo prítomnosťou podrastu. Rozhodujúca je funkčná schopnosť vegetačných prvkov vytvárať vertikálne spojenie medzi povrchovou vrstvou a korunovou bázou. Do tejto skupiny môžu patriť kroviny, prirodzené zmladenie, nízko položené živé alebo suché vetvy a ďalšie palivové prvky, ak znižujú vertikálne medzery medzi palivovými vrstvami. Viedma et al. (2024) ukazujú význam automatizovanej analýzy vertikálnej palivovej kontinuity a detekcie korunovej bázy z lidarových údajov.

Korunové palivo tvorí biomasa stromových korún, pričom pri šírení korunového požiaru je najvýznamnejšia jemná časť koruny. Preto sa množstvo korunového paliva nevyjadruje automaticky celkovou nadzemnou biomasou stromov. Pri použití alometrických alebo inventarizačných vzťahov sa musí explicitne určiť, ktorá časť biomasy sa považuje za dostupné korunové palivo a aká definícia bola použitá.

Základné parametre vertikálneho palivového profilu, ktoré vstupujú do priestorového odvodenia, sú uvedené v tabuľke 30.

Tabuľka 30 Základné parametre rebríkového a korunového paliva

Skupina	Parameter	Kód	Jednotka / typ	Význam
Rebríkové	vertikálny rozsah rebríkového paliva	rozsah_rebr	m	výškový interval obsadený funkčne významným palivom
Rebríkové	počet obsadených výškových pásiem	pocet_vrst	počet	miera vrstvenia paliva
Rebríkové	maximálna zvislá medzera	medzera_vrst	m	najväčšie neprerušené oddelenie susedných palivových pásiem
Rebríkové	vertikálna kontinuita	spojit_zvis	kategória / index	funkčné prepojenie povrchovej a korunovej vrstvy
Rebríkové	trieda rebríkového paliva	tried_rebr	trieda	odvodená klasifikácia vertikálneho prepojenia
Korunové	výška porastu	vyska_por	m	horná hranica stromovej vrstvy
Korunové	výška korunovej bázy	vyska_kor_b	m	funkčná dolná hranica súvislej korunovej vrstvy
Korunové	hĺbka koruny	hlb_kor	m	vertikálny rozsah korunovej vrstvy
Korunové	korunová pokrývnosť	pokryv_kor	%	plošné zastúpenie projekcie korún
Korunové	plošné množstvo korunového paliva	mnoz_kor	kg·m ⁻²	množstvo dostupného korunového paliva na jednotku pôdorysnej plochy
Korunové	objemová hustota korunového paliva	obj_hust_kor	kg·m ⁻³	množstvo dostupného paliva na jednotku objemu korunovej vrstvy
Korunové	horizontálna kontinuita korún	spojit_kor	kategória / index	priestorové prepojenie korunového paliva

6.2. Rebríkové palivo a vertikálna kontinuita

Terénne hodnotenie rebríkového paliva sa zakladá na vertikálnom profile definovanom v kapitole 3. Profil sa rozdeľuje na stabilné výškové pásma a v každom pásme sa zaznamenáva prítomnosť alebo neprítomnosť paliva, jeho dominantný typ a podľa potreby pokrývnosť alebo hustota. Takéto hodnotenie umožňuje oddeliť samotnú prítomnosť podrastu od skutočného vertikálneho spojenia palivových vrstiev.

Priestorová charakteristika rebríkového paliva sa nemá redukovať na jednu výšku. Dve lokality môžu mať rovnakú hornú hranicu podrastu, ale rozdielny počet obsadených pásiem a rozdielne zvislé medzery. Preto sa odporúča zachovať najmenej vertikálny rozsah, počet obsadených pásiem, maximálnu zvislú medzeru a výslednú triedu vertikálnej kontinuity.

Klasifikačná trieda rebríkového paliva je odvodený parameter. Jej hranice možno po získaní širšieho referenčného súboru kalibrovať, pričom pôvodné záznamy o obsadených pásmach a zvislých medzerách zostávajú nezmenené. Takýto postup umožňuje zmeniť klasifikačné pravidlo bez straty porovnateľnosti terénnych údajov.

Význam rebríkového paliva nemožno odvodzovať iba z celkovej nadzemnej biomasy. Hakkenberg et al. (2024) ukázali, že metriky vertikálnej kontinuity, najmä rebríkové palivo, môžu byť pri vysvetľovaní závažnosti požiaru informatívnejšie než samotné objemové charakteristiky korún. Tento výsledok podporuje samostatné mapovanie rebríkovej vrstvy namiesto jej zahrnutia do jednej všeobecnej korunovej veličiny.

6.3. Základné parametre korunového paliva

Priestorové hodnotenie korunového paliva sa zakladá na kombinácii geometrických a hmotnostných parametrov. Geometrickú zložku opisuje výška porastu, výška korunovej bázy, hĺbka koruny, korunová pokryvnosť a horizontálna kontinuita. Hmotnostnú zložku opisuje plošné množstvo a objemová hustota dostupného korunového paliva. Ani jedna skupina sama osebe neposkytuje úplný obraz o schopnosti porastu podporovať korunové horenie.

Výška korunovej bázy je z hľadiska požiaru funkčný parameter. Nemá sa automaticky stotožňovať s výškou najnižšie položenej živej vetvy. Priestorovo izolovaná vetva nemusí vytvárať dolnú hranicu súvislej korunovej vrstvy. Pri terénnom alebo lidarovom odvodení sa preto musí použiť jednotná definícia, ktorá zohľadní množstvo a vertikálnu kontinuitu paliva. Viedma et al. (2024) práve tento problém riešia automatizovanou analýzou vertikálnej štruktúry.

Korunová pokryvnosť vyjadruje projekciu korún na pôdorysnú plochu a je významná pri hodnotení horizontálnej kontinuity, ale nie je synonymom objemovej hustoty korunového paliva. Porasty s podobnou pokryvnosťou môžu mať rozdielnu hĺbku korún, druhové zloženie a množstvo jemnej biomasy. Preto sa tieto charakteristiky vedú samostatne.

Lidarové údaje predstavujú významný zdroj geometrických informácií o korunovej vrstve. Andersen, McGaughey a Reutebuch (2005) preukázali možnosť odvodiť z leteckého lidarú viacerých parametrov korunového paliva vrátane korunovej bázy a objemovej hustoty. Novšie európske práce ukazujú možnosti kombinovať priestorový lidar a satelitné údaje pri mapovaní korunových parametrov na rozsiahlych územiach (Aragoneses et al., 2024; Kutchartt et al., 2025).

6.4. Výška korunovej bázy a hĺbka koruny

Výška korunovej bázy sa pri terénnom zisťovaní alebo odvodení z lidarových údajov viaže na funkčnú dolnú hranicu súvislejšej korunovej vrstvy. Definícia musí byť rovnaká pri kalibračných aj overovacích údajoch. Ak sa v referenčnom súbore použije najnižšia živá vetva, zatiaľ čo model z lidarú deteguje štatistickú hranicu súvislej koruny, vzniká systematický nesúlad medzi referenciou a predikovaným parametrom.

Hĺbka koruny predstavuje rozdiel medzi výškou porastu a výškou korunovej bázy. Pri konzistentne definovaných vstupoch sa určí podľa vzťahu (53).

$$D_k = H - H_{kb} \quad (53)$$

kde

D_k – hĺbka koruny (m)

H – výška porastu (m)

H_{kb} – výška korunovej bázy (m)

Vzťah (53) je geometrický a sám osebe nevyjadruje množstvo ani hustotu korunového paliva.

Priestorové odvodenie korunovej bázy a hĺbky koruny sa vykonáva iba tam, kde sú vstupné údaje schopné vertikálnu štruktúru zachytiť. Optické satelitné údaje poskytujú predovšetkým informáciu o povrchových vlastnostiach korunovej vrstvy a na priamy odhad jej zvislej geometrie sú obmedzené.

Lidar poskytuje podstatne vhodnejší zdroj pre výškové parametre, ale aj pri ňom výsledok závisí od hustoty bodov, penetrácie signálu, charakteru porastu a definície odvodzovaného parametra.

Výsledná rastrová hodnota sa označuje podľa pôvodu. Priamo terénne meraná výška, lidarová metricky odvodená hodnota a modelová predikcia z kombinovaných vstupov sa nesmú v geodatabáze viesť bez možnosti ich rozlíšenia.

6.5. Plošné množstvo a objemová hustota korunového paliva

Plošné množstvo korunového paliva vyjadruje suchú hmotnosť tej časti korunovej biomasy, ktorá je podľa zvolenej definície považovaná za dostupné palivo, vzťahnutú na jednotku pôdorysnej plochy. Pri jednotlivom strome sa môže odvodiť z biometrických alebo alometrických vzťahov a následne agregovať na plochu. Ak sa používa modelová alometria, v metadátach sa uvedie druh alebo skupina drevín, rozsah platnosti a verzia vzťahu.

Objemová hustota korunového paliva vyjadruje množstvo dostupného korunového paliva na jednotku objemu korunovej vrstvy. V najvšeobecnejšom tvare sa zapíše podľa vzťahu (54).

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k} \quad (54)$$

kde

ρ_k – objemová hustota korunového paliva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

m_k – suchá hmotnosť definovaného dostupného korunového paliva (kg)

V_k – objem korunovej vrstvy, ku ktorému sa táto hmotnosť vzťahuje (m^3)

Pri použití vzťahu (54) musí byť spôsob určenia objemu koruny a dostupnej hmotnosti explicitne definovaný.

Priestorové mapovanie objemovej hustoty korunového paliva je metodicky náročnejšie než mapovanie samotnej výšky alebo pokryvnosti. Lidar poskytuje informáciu o geometrii a rozložení vegetácie, nie priamu suchú hmotnosť. Hmotnostná veličina preto vzniká až prostredníctvom kalibrovaného vzťahu s inventarizačnými alebo alometrickými údajmi. Andersen, McGaughey a Reutebuch (2005) ukázali, že takéto modelovanie je možné, ale jeho presnosť závisí od kvality referenčných údajov a štruktúry porastu.

Pri celoeurópskom mapovaní korunových palivových parametrov sa dnes využíva kombinácia GEDI a satelitných údajov. Aragoneses et al. (2024) vytvorili európske mapy vybraných korunových parametrov pri hrubšom priestorovom rozlíšení; Kutchartt et al. (2025) následne mapovali korunovú bázu a objemovú hustotu na pan-európskej úrovni. Takéto produkty môžu byť vhodným regionálnym vstupom alebo porovnávacím podkladom, ale ich prevzorkovanie na 10×10 m nevytvára 10 m informačnú podrobnosť.

6.6. Priestorové odvodenie rebríkového a korunového paliva

Priestorovo súvislé vrstvy rebríkového a korunového paliva vznikajú prepojením referenčných pozorovaní s priestorovými vysvetľujúcimi premennými. Model sa zostavuje osobitne pre každý parameter, pretože výška korunovej bázy, objemová hustota, korunová pokryvnosť a vertikálna kontinuita predstavujú odlišné veličiny s rozdielnou pozorovateľnosťou.

Všeobecný rámec priestorovej predikcie parametra $\hat{y}_k$ v polohe s možno zapísať vzťahom (55).

$$\hat{y}_k(s) = g_k[X_1(s), X_2(s), \dots, X_p(s)] \quad (55)$$

kde

$\hat{y}_k(s)$ – priestorový odhad parametra k v polohe s ,

g_k – kalibrovaný modelový vzťah

X_1 až X_p – vysvetľujúce priestorové premenné

Vzťah (55) nepredpisuje konkrétny algoritmus. Pri každom parametre sa vyberá metóda, ktorá je primeraná charakteru údajov a je overená nezávisle od kalibrácie.

Pri korunových parametroch možno medzi vysvetľujúce údaje zaradiť lidarové výškové a distribučné metriky, drevinové zloženie, zápoj, porastové charakteristiky, optické a radarové produkty a topografické údaje. Pri rebríkovom palive sú osobitne dôležité metriky zachytávajúce vegetáciu v spodných výškových pásmach a počet alebo hustotu vertikálnych vrstiev. V každom prípade musí byť preukázané, že zvolená premenná vysvetľuje konkrétny terénny parameter, a nie iba všeobecnú prítomnosť vegetácie.

Odporúčané zdroje a ich úloha pri priestorovom odvodení sú uvedené v tabuľke 31.

Tabuľka 31 Odporúčané zdroje pri priestorovom odvodení vertikálneho palivového profilu

Zdroj	Najvhodnejšie parametre	Úloha	Hlavné obmedzenie
Terénny vertikálny profil	rebríkové pásma, medzery, funkčná korunová báza	referenčné meranie a nezávislé overenie	obmedzené priestorové pokrytie
Pozemný / UAV LiDAR	podrast, zvislé pásma, korunová báza, geometria korún	detailná lokálna štruktúra	lokálny rozsah, náročnosť spracovania
Letecký LiDAR	výška, korunová báza, hĺbka, štruktúra a kontinuita	regionálne modelovanie geometrie	hmotnosť paliva sa odvodzuje nepriamo
GEDÍ a iný priestorový LiDAR	vertikálna štruktúra, výškové metriky	veľkoplošná kalibrácia a regionálny kontext	vzorkovanie a hrubšia priestorová podpora
Optické satelitné údaje	pokryvnosť, drevinové zloženie, zmeny vegetácie	plošné doplnenie a časová aktualizácia	obmedzená priama informácia o spodných vrstvách
Lesnícke údaje	drevinové zloženie, vek, zakmenenie, zásahy	stratifikácia a vysvetľujúci kontext	nie sú priamymi palivovými parametrami

6.7. Prepojenie povrchového, rebríkového a korunového paliva

Vertikálny potenciál porastu nemožno hodnotiť iba z korunových parametrov. Prechod povrchového požiariu do vyšších vrstiev závisí od súčasnej prítomnosti energeticky dostatočného povrchového požiariu, vertikálneho spojenia paliva a polohy korunovej bázy. Preto sa priestorové vrstvy kapitoly 5 a kapitoly 6 prepájajú až v následnom hodnotiacom kroku; základné palivové vrstvy zostávajú samostatné.

Nízka korunová báza bez rebríkového paliva môže predstavovať inú situáciu než vyššia korunová báza s hustým prirodzeným zmladením a viacerými obsadenými výškovými pásmami. Rovnaká hodnota

objemovej hustoty koruny môže mať rozdielny význam pri rôznej horizontálnej kontinuite korún. Výsledná interpretácia preto musí zachovať kombináciu vertikálnych aj horizontálnych charakteristík.

Scott a Reinhardt (2001) prepojili modely povrchového a korunového správania požiaru a vyvinuli ukazovatele relatívnej náchylnosti porastov na prechod do korún a udržanie korunového šírenia. Van Wagner (1977) už skôr formuloval fyzikálne podmienky iniciácie a udržania korunového požiaru. V tejto monografii sa tieto práce používajú ako teoretické východisko; kapitola však nevytvára operačný model korunového požiaru a nesmie zamieňať statickú palivovú predispozíciu s aktuálnym nebezpečenstvom vzniku požiaru (požiarnym nebezpečenstvom).

6.8. Hodnotenie potenciálu prechodu požiaru do korunovej vrstvy

Potenciál prechodu požiaru do korunovej vrstvy sa v metodike chápe ako štruktúrna predispozícia vytvorená kombináciou povrchového paliva, rebríkového paliva a korunovej geometrie. Nie je to pravdepodobnosť vzniku požiaru ani komplexné požiarné riziko. Je to podklad na identifikáciu miest, kde môže byť vertikálny rozvoj požiaru pri vhodných dynamických podmienkach jednoduchší.

Medzi základné statické vstupy patria výška korunovej bázy, trieda rebríkového paliva, maximálna zvislá medzera, horizontálna kontinuita povrchového paliva, korunová pokryvnosť a objemová hustota korunového paliva. Dynamické vstupy, najmä vlhkosť jemného paliva, vietor a intenzita povrchového horenia, sa do statickej vrstvy neukladajú ako nemenné hodnoty.

Ak sa vytvorí súhrnná trieda vertikálneho potenciálu, klasifikačné prahy a pravidlá sa musia explicitne definovať a verziovať. Jedna vysoká hodnota nesmie automaticky zaradiť bunku do najvyššej triedy. Napríklad vysoká objemová hustota korunového paliva bez vertikálneho spojenia nemusí znamenať vysoký potenciál prechodu povrchového požiaru do korún.

Odporúčaný interpretačný rámec je uvedený v tabuľke 32. Ide o logiku hodnotenia, nie o univerzálnu päťstupňovú klasifikáciu s pevnými numerickými prahmi.

Tabuľka 32 Interpretačný rámec vertikálneho palivového potenciálu

Charakteristika	Nízky vertikálny potenciál	Zvýšený vertikálny potenciál	Poznámka
Korunová báza	vyššie oddelená od spodných vrstiev	nižšie položená funkčná korunová báza	interpretuje sa spolu s rebríkovým palivom
Rebríkové palivo	málo obsadených pásiem, veľké medzery	viac obsadených pásiem, malé medzery	pôvodné pásma a medzery sa zachovávajú
Povrchové palivo	nízka kontinuita jemného paliva	súvislá jemná palivová vrstva	aktuálna vlhkosť sa hodnotí samostatne
Korunová pokryvnosť	fragmentované koruny	súvislejšia projekcia korún	nejde o náhradu objemovej hustoty
Objemová hustota korunového paliva	nižšia dostupná biomasa na objem	vyššia dostupná biomasa na objem	platí iba pri rovnakej definícii dostupného paliva

6.9. Tvorba, agregácia a aktualizácia mapových výstupov

Výstupom kapitoly je súbor samostatných rastrových alebo vektorových vrstiev, nie jedna všeobecná mapa korunového rizika. Základné vrstvy zahŕňajú vertikálny rozsah rebríkového paliva, počet obsadených pásiem, maximálnu zvislú medzeru, triedu rebríkového paliva, výšku porastu, výšku

korunovej bázy, hĺbku koruny, korunovú pokrývnosť, plošné množstvo korunového paliva, objemovú hustotu korunového paliva a horizontálnu kontinuitu korún.

Pri agregácii na JPRL sa spojitý parametre sumarizujú spôsobom zodpovedajúcim ich významu. Výška korunovej bázy alebo objemová hustota sa môžu vyjadriť priemerom alebo mediánom spolu s mierou variability a dátovým pokrytím. Pri kategorizovaných parametroch sa uvádza dominantná trieda a plošné podiely jednotlivých tried. JPRL sa nepovažuje automaticky za homogénnu palivovú jednotku.

Výstupná mriežka 10 × 10 m zostáva technickým pracovným rámcom. Pri každej vrstve sa uvádza skutočná informačná podrobnosť alebo pôvodná priestorová podpora. Pan-európsky produkt s približne hektometrovou alebo kilometrovou podporou nemožno po prevzorkovaní interpretovať ako lokálne 10 m meranie.

Aktualizácia korunových parametrov sa viaže na nové cykly laserového skenovania, hospodárske zásahy, kalamity, požiare, výrazné odumieranie a zmeny porastovej štruktúry. Rebríkové palivo môže reagovať aj na rýchlejší vývoj podrastu alebo prirodzeného zmladenia. Udalosť sama osebe neurčuje novú palivovú triedu, ale aktivuje kontrolu platnosti príslušnej vrstvy.

Odporúčaný súbor výstupov je uvedený v tabuľke 33.

Tabuľka 33 Odporúčaný súbor výstupov

Skupina	Výstup	Charakter	Hlavné využitie
Rebríkové palivo	rozsah_rebr, pocet_vrst, medzera_vrst, spojit_zvis, tried_rebr	spojitý / kategorizovaný	hodnotenie vertikálneho spojenia
Korunová geometria	vyska_por, vyska_kor_b, hlb_kor, pokryv_kor	spojitý	opis polohy a rozsahu korunovej vrstvy
Korunové množstvo	mnoz_kor, obj_hust_kor	spojitý	kvantifikácia dostupného korunového paliva
Korunová kontinuita	spojit_kor	kategorizovaný / index	opis horizontálneho prepojenia korún
Odvozená interpretácia	trieda vertikálneho potenciálu	odvođený	následný hodnotiaci rámec
Podpora a neistota	povod_udaja, podpora_dat, neistota	atribút / pomocná vrstva	interpretácia spoľahlivosti výsledku

6.10. Interpretácia, neistota a obmedzenia použitia

Korunové a rebríkové vrstvy sa interpretujú iba v rozsahu parametra, ktorý zobrazujú. Nízka výška korunovej bázy znamená menšiu geometrickú vzdialenosť medzi spodnými a korunovými vrstvami, nie automaticky vysokú pravdepodobnosť korunového požiaru. Vysoká objemová hustota opisuje množstvo dostupného korunového paliva v objeme, ale nehovorí sama o intenzite povrchového požiaru ani o aktuálnej vlhkosti paliva.

Neistota vzniká pri terénnom definovaní funkčnej korunovej bázy, pri biometrickom a alometrickom odvodení hmotnosti, pri lidarovej detekcii spodných vegetačných vrstiev, pri priestorovej interpolácii a modelovaní a pri časovom nesúlade vstupov. Osobitne sa eviduje extrapolácia mimo rozsah podmienok reprezentovaných kalibračnými údajmi.

Pri objemovej hustote a plošnom množstve korunového paliva sa má neistota alometrického alebo inventarizačného modelu považovať za súčasť výslednej neistoty. Ak sa rovnaký alometrický vzťah použije pri tvorbe modelu aj pri vytvorení „referenčných“ údajov na jeho overenie, nejde o úplne nezávislé overenie hmotnostného parametra.

Pri porovnávaní rôznych mapových produktov musí byť zhodná definícia parametra. Korunová báza odvodená inou algoritmickou definíciou, objemová hustota založená na inom vymedzení dostupného paliva alebo rebríková vrstva založená na iných výškových pásmach nemajú byť bez harmonizácie priamo porovnávané.

Národná mapa poskytuje strategický a regionálny podklad. Pri lokálnom plánovaní zásahu, navrhovaní protipožiarnych opatrení alebo hodnotení konkrétneho porastu sa má overiť aktuálnym terénnym alebo detailným diaľkovo snímaným údajom. Jemná grafická mriežka sama osebe nezvyšuje informačnú presnosť.

Takto formulovaná kapitola prepája povrchové palivo kapitoly 5 s vertikálnou štruktúrou lesa bez toho, aby statické palivové charakteristiky zamieňala s operačnou predpoveďou korunového požiaru. Získané vrstvy vytvárajú fyzikálne a priestorovo interpretovateľný základ pre palivové modely v kapitole 7 a pre neskoršie hodnotenie nebezpečenstva vzniku požiaru a samotného rizika vzniku požiaru.

7. NÁVRH A TVORBA PALIVOVÝCH MODELOV PRE LESNÉ PROSTREDIE SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Palivový model je účelová reprezentácia palivového komplexu určená pre konkrétny modelovací alebo hodnotiaci postup. Neopisuje celý lesný ekosystém a nemá sa stotožňovať s typom porastu, hospodárskym súborom lesných typov ani s jednou mapovou triedou vegetácie. Jeho význam spočíva v tom, že vyjadruje tie vlastnosti paliva, ktoré príslušný model správania požiaru potrebuje na výpočet. Pri klasickom modelovaní povrchového šírenia ide najmä o množstvo vybraných palivových frakcií, ich jemnosť, hĺbku palivového lôžka, vlhkosť vyhasnutia a ďalšie parametre definované modelovým systémom (Rothermel, 1972; Scott a Burgan, 2005).

V aktuálnej metodike monografie sa tvorba palivových modelov oddeľuje od predchádzajúceho mapovania palivových parametrov. Kapitoly 3 až 6 vytvárajú fyzikálne interpretovateľný palivový profil: množstvo a štruktúru povrchového paliva, dominantný nositeľ šírenia, horizontálnu kontinuitu, rebříkové palivo a korunové parametre. Až z tohto profilu sa odvodzuje palivový model pre konkrétnu aplikáciu. Tým sa zabraňuje tomu, aby sa typologická alebo porastová kategória mechanicky premenila na modelové parametre, ktoré neboli zistené ani overené.

Ako referenčný systém pre modelovanie povrchového požiaru možno používať súbor 40 štandardných modelov Scotta a Burgana (2005), často označovaný ako FBFM40. Tento systém je určený pre Rothermelov model povrchového šírenia a rozlišuje palivové modely podľa dominantného nositeľa šírenia, množstva a štruktúry paliva. Pre európsky kontext je významná aj hierarchická klasifikácia Aragoneses et al. (2023), ktorá prepája typ paliva, vertikálne vrstvy a použitie palivových modelov na kontinentálnej úrovni. Európske alebo americké modely však v tejto metodike predstavujú referenčný rámec, nie automaticky platnú národnú klasifikáciu.

Cieľom kapitoly je preto definovať reprodukovateľný postup, ktorým sa palivový profil slovenskej lesnej lokality alebo rastrovej bunky porovná s existujúcimi štandardnými modelmi, prípadne sa identifikuje potreba vytvorenia lokálne kalibrovaného modelu. Postup zároveň určuje spôsob dokumentovania priradenia, overenia modelu, priestorového spracovania, aktualizácie a evidencie neistoty. Palivový model zostáva oddelený od aktuálnej vlhkosti paliva, meteorologických podmienok a parametrov korunovej vrstvy, pokiaľ ich konkrétny modelovací systém nevyžaduje ako samostatné vstupy.

7.1. Význam palivových modelov pri hodnotení správania požiaru

Palivový model vytvára rozhranie medzi opisom reálneho paliva a matematickým modelom správania požiaru. Rothermel (1972) formuloval model povrchového šírenia, v ktorom sa heterogénne palivové lôžko reprezentuje súborom fyzikálnych a modelových parametrov. Anderson (1982) následne spracoval praktickú pomôcku pre výber pôvodných 13 modelov podľa nositeľa šírenia a charakteru paliva. Scott a Burgan (2005) rozšírili referenčný súbor na 40 štandardných modelov s väčším rozsahom palivových situácií a s dynamickými modelmi bylinného paliva.

Model je správne zvolený vtedy, keď reprezentuje palivo, ktoré pri uvažovaných podmienkach riadi povrchové šírenie, nie vtedy, keď sa jeho názov najviac podobá botanickému alebo lesníckemu opisu porastu. V lesnom poraste môže byť nositeľom šírenia kompaktný listový opad, ihličnatý opad, tráva v presvetlenom poraste, krovínový podrast alebo jemné zvyšky po ťažbe. Tá istá drevina preto môže byť

v rozdielnom vývojovom stave alebo po disturbancii reprezentovaná rozdielnym povrchovým palivovým modelom.

Palivový model sa v tejto monografii nepoužíva ako ukazovateľ pravdepodobnosti vzniku požiaru. Jeho primárnou úlohou je reprezentovať palivé lôžko pre výpočet správania už iniciovaného povrchového požiaru. Pri hodnotení nebezpečenstva vzniku požiaru sa samostatne uplatňuje prítomnosť iniciačne významného paliva, jeho aktuálna vlhkosť a iniciačné podmienky. Toto rozlíšenie zabraňuje miešaniu palivového modelu s indexom požiarneho nebezpečenstva alebo rizika.

Základné rozdiely medzi palivovým profilom, palivovým typom, palivovým modelom a dynamickými vstupmi sú uvedené v tabuľke 34.

Tabuľka 34 Rozlíšenie základných pojmov používaných pri tvorbe palivových modelov

Pojem	Obsah	Spôsob vzniku	Úloha
Palivový profil	merané alebo odvodené fyzikálne a štruktúrne charakteristiky povrchového, rebríkového a korunového paliva	terénne meranie, DPZ, modelové odvodenie	základná odborná reprezentácia reálneho paliva
Palivový typ	kategória opisujúca podobný charakter palivového komplexu	klasifikačné pravidlo	tematické mapovanie a interpretácia
Povrchový palivový model	parametre požadované konkrétnym modelom povrchového šírenia	výber štandardného modelu alebo kalibrácia vlastného modelu	výpočet správania povrchového požiaru
Rebríkové a korunové parametre	vertikálna kontinuita, korunová báza, pokryvnosť, množstvo a objemová hustota korunového paliva	samostatné meranie alebo odvodenie	hodnotenie vertikálneho a korunového potenciálu
Dynamický stav	aktuálna vlhkosť, vietor, teplota a ďalšie časovo premenlivé veličiny	meranie alebo časovo viazaný model	scenárový alebo operačný vstup; nie trvalý atribút modelu

7.2. Referenčné prístupy ku klasifikácii palivových modelov

Pri návrhu systému pre Slovensko sa odporúča rozlišovať tri úrovne: referenčný štandardný palivový model, národné pravidlo jeho priradenia a prípadný lokálne kalibrovaný model. Tieto úrovne sa nesmú významovo zlúčiť. Kód GR4 alebo TL6 napríklad označuje konkrétny štandardný model Scotta a Burgana (2005). Slovenské pravidlo určuje, za akých meraných podmienok možno tento model považovať za vhodného kandidáta. Ak sa jeho parametre zmenia, už nejde o nezmenený štandardný model a musí sa viesť ako vlastný kalibrovaný variant s osobitným identifikátorom a verziiou.

Scott a Burgan (2005) rozdelili 40 štandardných modelov do šiestich skupín podľa dominantného nositeľa povrchového šírenia: trávy (GR), trávy a kroviny (GS), kroviny (SH), les s významným podrastom (TU), lesný opad (TL) a ťažbové alebo polomové zvyšky (SB). Niektoré modely sú dynamické a umožňujú meniť rozdelenie bylinného paliva medzi živú a odumretú zložku podľa jeho vlhkového stavu. Toto dynamické správanie je vlastnosťou konkrétneho modelu a nemá sa zamieňať s pravidelnou aktualizáciou mapovej vrstvy.

Pre európske územie Aragoneses et al. (2023) navrhli hierarchickú, viacúčelovú klasifikáciu paliva, ktorá rozlišuje hlavné kategórie krajinného pokryvu a pri lesoch pracuje so spodnou a hornou vegetačnou vrstvou. Tento systém je vhodný ako porovnávací a harmonizačný rámec, ale pri použití na Slovensku sa musí preveriť, či priradený model reprodukuje lokálne palivové pomery a požadovaný typ správania požiaru.

Základné skupiny FBFM40 a ich funkčný význam sú zhrnuté v tabuľke 35. Tabuľka slúži iba na predbežný výber skupiny; konečný model sa vyberá podľa konkrétneho palivového profilu a následného overenia.

Tabuľka 35 Funkčné skupiny štandardných modelov FBFM40 podľa Scotta a Burgana (2005)

Skupina	Počet modelov	Dominantný nositeľ šírenia	Typické použitie pri predbežnom výbere
GR	9	trávy	otvorené alebo presvetlené plochy, kde je súvislá jemná trávnatá vrstva hlavným nositeľom šírenia
GS	4	trávy a kroviny	kombinovaná trávna-krovinová vrstva
SH	9	kroviny	povrchové alebo nízke objemové krovinné palivo
TU	5	les s podrastom	lesné prostredie, v ktorom povrchové šírenie významne ovplyvňuje tráva, kroviny alebo iný podrast
TL	9	lesný opad	lesný povrch, kde šírenie riadi opad a jemné drevné zložky
SB	4	ťažbové/polomové zvyšky	plochy s významným podielom jemných a stredných zvyškov po ťažbe alebo disturbancií

7.3. Východiská tvorby palivových modelov pre podmienky Slovenska

Národná metodika musí vychádzať z palivových charakteristík skutočne zistených v slovenských porastoch. HSLT, SLT, drevinové zloženie a ďalšie lesnícke údaje sú vhodné na stratifikáciu a predbežnú interpretáciu stanovišťa, ale nie na priame generovanie parametrov palivového modelu. Typologická jednotka neobsahuje informáciu o aktuálnom množstve jemného paliva, výške palivového lôžka, horizontálnej kontinuite, podrastovej vrstve ani zvyškoch po ťažbe v konkrétnom čase.

Základom národného postupu je preto palivový profil vytvorený podľa kapitol 3 až 6. Pre povrchový model sú rozhodujúce najmä dominantný nositeľ šírenia, množstvo jemného odumretého paliva a ďalších modelovo relevantných frakcií, bylinné a krovinné palivo, hĺbka palivového lôžka a jeho kontinuita. Rebríkové a korunové charakteristiky sa vedú samostatne a neprenášajú sa do parametrov FBFM40, pokiaľ konkrétny modelovací systém nepožaduje oddelené korunové vstupy.

Navrhovaný postup pracuje s tromi stavmi priradenia. „referencne“ znamená, že profil bol priamo zmeraný alebo dostatočne podložený a štandardný model bol vybraný na základe porovnania parametrov. „odvodene“ označuje priestorové priradenie modelu na základe kalibrovaného pravidla alebo predikčného modelu. „predbežne“ označuje model priradený prevažne z nepriamych podkladov a vyžadujúci terénne alebo nezávislé overenie. Stav priradenia sa uchováva v geodatabáze spolu s dátovou podporou a neistotou.

Slovenský národný systém sa preto nemá definovať ako jednorazový zoznam väzieb HSLT/SLT → FBFM40. Má byť verziovaným súborom pravidiel, ktorý možno opakovane aplikovať na aktualizovaný

palivový profil a pri získaní nových referenčných údajov kalibrovať alebo meniť bez prepisovania pôvodných meraní.

7.4. Vzťah medzi typom porastu, stanovištnými podmienkami a palivovým modelom

Typ porastu a stanovištné podmienky sa pri priradovaní modelu používajú ako kontextové premenné. Drevinové zloženie ovplyvňuje charakter opadu a potenciálnu architektúru podrastu, zakmenenie a zápoj ovplyvňujú svetelné a mikroklimatické podmienky a hospodársky stav môže indikovať prítomnosť zvyškov alebo mladých sukcesných vrstiev. Žiadna z týchto informácií však sama osebe neurčuje model.

Najskôr sa určuje dominantný nositeľ povrchového šírenia. Ak ho tvorí súvislá trávnatá vrstva, kandidát sa hľadá v skupine GR alebo GS; pri krovinovom palive v SH; pri lesnom opade v TL; pri významnom podraсте v TU a pri ťažbových alebo polomových zvyškoch v SB. Až v rámci tejto funkčnej skupiny sa porovnávajú ďalšie fyzikálne a modelové charakteristiky. Takýto postup zodpovedá princípu výberu modelu podľa paliva, ktoré riadi šírenie, a nie podľa názvu vegetácie (Anderson, 1982; Scott a Burgan, 2005).

HSLT/SLT možno použiť na vytvorenie strát pre výber terénnych plôch a na identifikáciu ekologicky podobných jednotiek. Ak však aktuálny palivový stav zistený terénne alebo z aktuálnych priestorových údajov odporuje typologickému predpokladu, prednosť má doložený aktuálny palivový profil. To je dôležité najmä pri mladinách, presvetlených porastoch, kalamitných územiach, plochách po ťažbe, sukcesných plochách a porastoch s hustým podrastom.

Rozhodovací postup preto obsahuje jasnú hierarchiu dôkazov: priame referenčné meranie → kalibrovaný priestorový odhad palivového parametra → aktuálny údaj DPZ o štruktúre a disturbancii → porastová databáza → typologicky podmienený predbežný výber palivového modelu. Nižšia úroveň nesmie bez zdôvodnenia prepísať informáciu z vyššej úrovne. Táto hierarchia je uvedená v tabuľke 36.

Tabuľka 36 Hierarchia podkladov pri priradovaní povrchového palivového modelu

Priorita	Zdroj	Funkcia	Pravidlo použitia
1	terénny palivový profil	referenčný opis paliva	najvyššia váha pri výbere a overení modelu
2	overená priestorová vrstva palivového parametra	priestorové rozšírenie referenčných vzťahov	použiť iba v rozsahu kalibračnej podpory
3	aktuálne DPZ a údaje o disturbanciách	kontrola súčasného stavu a štruktúry	spresňuje alebo aktivuje kontrolu platnosti
4	porastové a hospodárske údaje	kontext a stratifikácia	nepoužívať ako priamu náhradu palivového profilu
5	HSLT/SLT a širší ekologický rámec	predbežná stratifikácia	iba typologicky podmienený predbežný výber; vyžaduje kontrolu aktuálnym palivovým stavom

7.5. Parametre palivových modelov

Parametre štandardného palivového modelu sa musia interpretovať podľa modelovacieho systému, pre ktorý bol model vytvorený. V FBFM40 sa pracuje s množstvom odumretého paliva v 1-hodinovej, 10-hodinovej a 100-hodinovej triede, s množstvom živého bylinného a živého drevnatého paliva, s pomerom povrchu k objemu vybraných frakcií, hĺbkou palivového lôžka, vlhkosťou vyhasnutia

odumretého paliva a tepelným obsahom (Scott a Burgan, 2005). 1 000 h drevné palivo sa síce môže terénne evidovať a je významné pre spotrebu a dohorievanie, ale nie je samostatnou palivovou hmotnostnou triedou vstupujúcou do štandardných modelov FBFM40 pre výpočet povrchovej rýchlosti šírenia.

Terénne veľkostné kategórie definované v kapitole 3 sú s časovými triedami kompatibilné približne rozmerovo, ale priradenie sa musí vykonať explicitným prevodovým pravidlom. Časové označenie 1 h, 10 h alebo 100 h neznamena nameraný čas vysychania konkrétneho kusu paliva; ide o modelové kategórie spojené s rozmerom a vlhkosťou odozvu. Pôvodná terénna veľkostná trieda sa preto zachováva a modelová trieda je odvodeným atribútom.

Vlhkosť vyhasnutia je parameter palivového modelu, nie aktuálna nameraná vlhkosť paliva. Vyjadruje modelovú hranicu, pri ktorej sa pri referenčných podmienkach už neudrží šírenie povrchového požiaru. Aktuálna vlhkosť jednotlivých frakcií sa zadáva do modelovania ako samostatný dynamický vstup. Zmiešanie týchto dvoch veličín by viedlo k nesprávnej interpretácii modelu.

Pri vlastnom národnom alebo lokálnom modeli sa každý parameter musí opierať o meranie, publikovaný vzťah alebo kalibračný postup. Nie je prípustné meniť parameter štandardného modelu len preto, aby sa jeho názov lepšie prispôbil slovenskému porastu, a pritom model naďalej označovať pôvodným kódom. Minimálny súbor údajov, ktorý sa má pri modelovej karte evidovať, je uvedený v tabuľke 37.

Tabuľka 37 Minimálny obsah karty povrchového palivového modelu

Oblasť	Obsah	Poznámka
Identifikácia	kód modelu, názov, verzia, typ: štandardný/vlastný	zmena parametrov vyžaduje novú verziu alebo nový kód
Nosič šírenia	tráva, tráva-kroviny, kroviny, podrast, opad, zvyšky	určuje prvotný výber modelovej skupiny
Množstvo paliva	1 h, 10 h, 100 h, živé bylinné, živé drevnaté	jednotky musia zodpovedať modelu; pôvodné SI hodnoty sa zachovávajú
Štruktúra	hlbka palivového lôžka a súvisiace modelové charakteristiky	nesmie sa odvodiť iba z názvu porastu
Jemnosť paliva	pomer povrchu k objemu pre modelovo relevantné frakcie	merať, odvodiť alebo prevziať len so zdrojmi
Vlhkostný parameter	vlhkosť vyhasnutia odumretého paliva	odlišná od aktuálnej vlhkosti
Energetický parameter	tepelný obsah podľa definície modelovacieho systému	laboratórna výhrevnosť nie je automaticky totožná s modelovým parametrom
Dokumentácia	zdroj, spôsob odvodenia, kalibrácia, overenie, neistota	povinné pre reprodukovateľnosť

7.6. Viacstupňové priradenie palivového modelu

Priradenie modelu sa navrhuje ako viacstupňový proces. V prvom kroku sa určí dominantný nositeľ povrchového šírenia a tým aj prípustná skupina štandardných modelov. V druhom kroku sa z referenčného palivového profilu zostaví súbor parametrov, ktoré možno priamo porovnať so štandardnými modelmi. V treťom kroku sa vyberie jeden alebo viac kandidátskych modelov a porovnajú sa ich parametre s lokálnym profilom. Vo štvrtom kroku sa kandidáti overia pomocou

nezávislých terénnych údajov a, ak sú k dispozícii, pomocou pozorovaného alebo experimentálne odvodeného správania požiaru.

Na transparentné porovnanie referenčnej hodnoty s hodnotou kandidátskeho modelu možno pre každý parameter vypočítať normalizovanú odchýlku podľa vzťahu (56):

$$d_{jm} = \frac{abs(x_j - p_{jm})}{R_j} \quad (56)$$

kde

d_{jm} – normalizovaná odchýlka parametra j od kandidátskeho modelu m

x_j – referenčná hodnota z palivového profilu

p_{jm} – hodnota toho istého parametra v kandidátskom modeli

R_j – vopred definovaný normalizačný rozsah parametra

Normalizačný rozsah sa určuje z odborne zdôvodneného kalibračného súboru alebo z rozsahu relevantných modelov; nesmie sa voliť tak, aby umelo zvýhodnil konkrétny model.

Ak sa porovnáva viac parametrov, možno vypočítať váženú vzdialenosť kandidátskeho modelu podľa vzťahu (57):

$$D_m = \sum \alpha_j d_{jm}, \quad \sum \alpha_j = 1 \quad (57)$$

V rámci vopred určenej funkčnej skupiny sa za kandidáta s najmenšou váženou vzdialenosťou môže označiť model podľa vzťahu (58):

$$m_{sel} = \arg \min D_m, \quad m \in M_c \quad (58)$$

kde

m_{sel} – vybraný kandidátsky model,

D_m – vážená vzdialenosť kandidátskeho modelu m

M_c – množina kandidátskych modelov vo vopred určenej funkčnej skupine.

Najnižšia hodnota D_m predstavuje iba pomocné numerické kritérium; nenahrádza odbornú kontrolu fyzikálneho významu modelu ani nezávislé overenie.

Ak žiadny štandardný model nedosahuje prijateľnú zhodu a rozdiel sa opakovane prejavuje na reprezentatívnych slovenských lokalitách, možno uvažovať o vytvorení vlastného modelu. Takýto model musí mať samostatný kód, úplnú parameterizáciu, kalibračný rozsah, nezávislé overenie a dokumentáciu dôvodu, pre ktorý štandardné modely nepostačovali.

7.7. Povrchové palivové modely pre lesné prostredie Slovenska

Pri lesných porastoch Slovenska sa pri predbežnom výbere očakáva časté využitie skupín TL a TU, pretože povrchové šírenie môže byť viazané na lesný opad alebo na kombináciu opadu s podrastom. Toto však nie je univerzálne pravidlo. Povrchové šírenie požiaru v presvetlených porastoch, na sukcesných plochách a v mladinách môže byť riadené palivom, t. j. trávnatým alebo krovinovým palivom, zatiaľ čo kalamitné a poťažbové plochy môžu funkčne zodpovedať skupine SB. Každé takéto priradenie sa musí opierať o aktuálny palivový profil.

Pri listnatých porastoch sa nesmie automaticky priradiť jeden model len na základe prítomnosti listového opadu. Rozhoduje jeho množstvo, hĺbka, kompaktnosť, kontinuita a prítomnosť bylinného alebo krovinného podrastu. Rovnako ihličnatý porast nemusí byť reprezentovaný jedným modelom TL; pri presvetlení alebo obnove môže dominantný nositeľ prejsť do trávy, krovín alebo kombinovaného podrastu.

Dynamické modely FBFM40 sa používajú iba tam, kde je skutočne významná sezónne sa meniaci bylinná zložka. Ich dynamika spočíva v modelovom prerozdelení bylinného množstva medzi živú a odumretú zložku podľa aktuálnej vlhkosti živého bylinného paliva (Scott a Burgan, 2005). Nie je vhodné označiť lesný model za dynamický iba preto, že sa palivo počas roka všeobecne mení.

Pri národnom mapovaní sa preto neodporúča publikovať jednoduchú pevnú tabuľku drevina alebo HSLT/SLT → FBFM40 bez uvedenia podmienok platnosti. Vhodnejší je rozhodovací slovník, v ktorom typologická jednotka vytvára iba predbežný kontext a rozhodujúce pravidlá vychádzajú z dominantného nositeľa šírenia a z meraných alebo overene odvodených palivových parametrov.

7.8. Prepojenie povrchového palivového modelu s rebríkovými a korunovými parametrami

Štandardný model FBFM40 reprezentuje povrchové palivo pre Rothermelov model povrchového šírenia. Neobsahuje úplný opis rebríkového ani korunového paliva. Preto sa v tejto metodike nepoužíva kategória „povrchový palivový model s korunovým potenciálom“ ako náhrada samostatných vertikálnych parametrov. Rovnaký povrchový model môže ležať pod porastom s veľmi rozdielnou výškou korunovej bázy, rebríkovou kontinuitou a objemovou hustotou korún.

Pre hodnotenie prechodu do korunovej vrstvy sa k povrchovému modelu pripájajú samostatné vrstvy z kapitoly 6: výška korunovej bázy, rebríkové palivo a vertikálna kontinuita, korunová pokryvnosť a objemová hustota korunového paliva. Ak modelovací systém používa prístup Scotta a Reinhardtovej (2001) alebo iný model korunového správania, tieto údaje sa exportujú v jeho požadovaných jednotkách a štruktúre, pričom pôvodné analytické vrstvy zostávajú nezmenené.

Takéto oddelenie zabraňuje dvojitému započítaniu. Hustý podrast môže ovplyvniť výber povrchovej skupiny TU a súčasne môže mať funkciu rebríkového paliva; pri následnom hodnotení sa však musí jasne rozlíšiť, ktorá časť informácie vstupuje do povrchového modelu a ktorá do samostatného vertikálneho ukazovateľa.

Výsledný modelovací balík pre lokalitu alebo bunku preto pozostáva najmenej z identifikátora povrchového modelu, dynamickej vlhkosti požadovaných palivových frakcií, topografických a meteorologických vstupov a, pri modelovaní korunového správania, zo samostatných korunových a rebríkových parametrov. Žiadna z týchto dynamických alebo korunových veličín sa nemá skryť v názve povrchového palivového modelu.

7.9. Tvorba priestorovej vrstvy palivových modelov

Priestorová vrstva palivových modelov je odvodený klasifikačný produkt geodatabázy. Vzniká aplikáciou verziovaného rozhodovacieho alebo predikčného pravidla na palivové parametre z kapitol 5 a 6 a na doplnkové kontextové údaje. Zdrojové fyzikálne vrstvy sa po priradení modelu neprepisujú a zostávajú dostupné na opätovnú klasifikáciu pri zmene pravidla.

Pracovná mriežka 10 × 10 m môže byť použitá ako technický nosič výsledného kódu modelu, ale neznamená, že priradenie má 10 m informačnú podrobnosť. Pri každej bunke sa uchováva pôvod rozhodujúcich vstupov, dátová podpora a stav priradenia. Ak je klasifikácia založená na hrubšom porastovom alebo európskom produkte, prevzorkovanie nemení jeho skutočnú informačnú podporu.

Na hraniciach dvoch palivových situácií alebo v heterogénnych bunkách sa nesmie nútené vytvoriť falošná istota. Ak to modelovací softvér vyžaduje, možno exportovať dominantný model, ale analytická databáza má podľa možností zachovať aj alternatívny kandidátsky model, podiel alebo skóre podpory a dôvod klasifikácie. Pri agregácii na JPRL sa uvádza dominantný model a plošné podiely modelov; JPRL sa nepovažuje automaticky za palivovo homogénnu jednotku.

Odporúčaná atribútová štruktúra priestorovej vrstvy palivových modelov je uvedená v tabuľke 38.

Tabuľka 38 Odporúčaná atribútová štruktúra vrstvy palivových modelov

Pole	Obsah	Poznámka
model_kod	kód priradeného štandardného alebo vlastného modelu	napr. štandardný kód sa nemení bez zmeny parameterizácie
model_ver	verzia národného priraďovacieho pravidla alebo vlastného modelu	umožňuje reprodukciu starších máp
nositel_sir	dominantný nositeľ povrchového šírenia	základ funkčného predbežného výberu
stav_prir	referenčné / odvodené / predbežné	odlišuje úroveň dôkaznej podpory
zdroj_prir	referenčná plocha, model, pravidlo alebo dataset	sledovateľnosť priradenia
alt_model	alternatívny kandidát, ak je odborne relevantný	voliteľné pri nejednoznačnom priradení
podpora_dat	úroveň dátovej podpory	neodvodzuje sa iba z zhody s inou mapou
neistota	kvantitatívna alebo kategóriová neistota	spôsob výpočtu alebo pravidlo musí byť zdokumentované
datum_plat	referenčné obdobie stavu paliva	odlišné od dátumu exportu
poznamka	dôvod výnimky, disturbance alebo manuálnej kontroly	odborná auditná stopa

7.10. Využitie a overenie palivových modelov pri modelovaní správania požiaru

Palivový model sa má overovať podľa účelu, pre ktorý je určený. Zhoda názvu modelu s opisom vegetácie nie je validačným dôkazom. Pri povrchovom modeli je rozhodujúce, či pri porovnateľných podmienkach poskytuje prijateľný odhad sledovaných charakteristík správania požiaru, napríklad rýchlosti šírenia alebo dĺžky (výšky) plameňa, a či jeho parameterizácia zodpovedá referenčnému palivovému profilu.

Overenie sa vykonáva na údajoch, ktoré neboli použité pri výbere alebo kalibrácii modelu. Ak nie sú dostupné pozorované požiare, možno použiť kontrolované experimenty, odborne zdokumentované skúšobné pálenie alebo citlivostnú analýzu, ale výsledok sa musí označiť podľa skutočnej úrovne dôkazu. Simulácia vykonaná tým istým modelom a s tými istými parametrami, ktoré boli použité na kalibráciu, nie je nezávislým overením.

Pri porovnávaní kandidátskych modelov sa musia používať rovnaké meteorologické, topografické a vlhkostné scenáre. Rozdiel vo výstupe potom možno priradiť palivovému modelu, nie súčasnej zmene

viacerých vstupov. Pri dynamických modeloch sa skúša viac realistických stavov vlhkosti živého bylinného paliva, aby sa overilo, či model poskytuje fyzikálne prijateľnú sezónnu odozvu.

Výsledok overenia sa zapisuje do modelovej karty a do metadát priestorovej vrstvy. Minimálne sa uvádza počet a rozloženie overovacích lokalít, charakter referencie, scenáre vstupov, porovnávané výstupy, použité metriky chyby a rozsah podmienok, v ktorom bol model overený. Model, ktorý je vhodný pri nízkej až strednej rýchlosti vetra, sa bez ďalšieho overenia nesmie deklarovať ako spoľahlivý v extrémnych podmienkach.

7.11. Neistota, limity a aktualizácia palivových modelov

Palivový model je zámerné zjednodušenie reálneho palivového komplexu. Jeho neistota vzniká už pri terénnom zisťovaní a pokračuje pri priestorovom odvodení parametrov, klasifikácii dominantného nositeľa, výbere štandardného modelu a použití modelu mimo rozsahu kalibračných podmienok. Jedna trieda neistoty preto nemá bez vysvetlenia zlučovať chybu merania, nízku dátovú podporu a neistotu samotného modelového priradenia.

Osobitným zdrojom neistoty je podobnosť viacerých štandardných modelov. Ak dva modely poskytujú podobnú zhodu s referenčným profilom, výsledok sa nemá prezentovať ako jednoznačný len preto, že klasifikačný algoritmus vybral o málo menšiu numerickú vzdialenosť. Takáto bunka alebo lokalita sa označí ako nejednoznačná a podľa účelu sa vykoná citlivostné porovnanie oboch kandidátov.

Palivový model sa aktualizuje vtedy, keď sa zmení palivový komplex alebo keď nová informácia zmení jeho odbornú interpretáciu. Spúšťačmi sú najmä ťažba, kalamita, požiar, rozsiahle odumieranie, obnova, sukcesia, výrazný rozvoj podrastu alebo nové referenčné mapovanie. Aktualizácia sa vykonáva novým použitím priradovacieho pravidla na aktualizované fyzikálne vrstvy; pôvodná verzia mapy a modelového priradenia zostáva archivovaná.

Dynamická vlhkosť paliva nie je dôvodom na preklasifikovanie stabilného povrchového modelu pri každej zmene počasia. Vstupuje do simulácie ako dynamická veličina. Výnimkou sú dynamické bylinné modely, v ktorých zmena vlhkosti ovplyvňuje rozdelenie bylinného paliva medzi živú a odumretú frakciu v rámci definície modelu (Scott a Burgan, 2005).

Medzinárodné modely majú byť v slovenskom prostredí používané ako štandardizovaný modelovací jazyk, nie ako nekritická náhrada domácej evidencie paliva. Ak sa vytvorí vlastný slovenský model, jeho vedecká hodnota bude závisieť od transparentnej parametrizácie, nezávislého overenia a preukázania, že v definovanom rozsahu podmienok poskytuje lepšiu alebo odborne primeranejšiu reprezentáciu než dostupný štandardný model.

Takto navrhnutá metodika zachováva väzbu medzi meraným palivovým profilom a konkrétnym modelovacím vstupom. Zároveň umožňuje meniť priradovacie pravidlá, porovnávať alternatívne modely a aktualizovať mapu bez straty pôvodných fyzikálnych údajov. Kapitola 7 tak vytvára rozhranie medzi priestorovým mapovaním paliva v kapitolách 5 a 6 a následným hodnotením požiarnych vlastností, správania požiaru a rizika vzniku požiaru.

8. HODNOTENIE POŽIARNÝCH VLASTNOSTÍ LESNÝCH PALÍV A ICH PREPOJENIE S MAPOVANÍM

Priestorové mapovanie lesného paliva opisuje, kde sa jednotlivé palivové zložky nachádzajú, v akom množstve sú zastúpené a ako sú usporiadané v povrchovej, rebríkovej a korunovej vrstve. Samotný priestorový údaj však nepostačuje na posúdenie toho, ako bude konkrétny materiál reagovať na iniciačný zdroj, tepelný tok alebo postupujúce čelo požiaru. Na funkčnú interpretáciu palivového profilu je preto potrebné doplniť mapované parametre o experimentálne stanovené požiarne vlastnosti dominantných palivových zložiek.

Požiarne vlastnosti sa v tejto kapitole nechápu ako jedna univerzálna charakteristika materiálu. Zapáliteľnosť, vlhkosť, priebeh tepelného rozkladu, strata hmotnosti, DSC signál, množstvo popola, spalné teplo a výhrevnosť opisujú rozdielne procesy a musia sa interpretovať v súvislosti s konkrétnym spôsobom skúšania. Výsledok laboratórneho testu je vždy viazaný na prípravu vzorky, jej rozmer a hmotnosť, obsah vody, hustotu uloženia, atmosféru, tepelný režim a kritérium hodnotenia. Laboratórna hodnota preto nie je automaticky vlastnosťou celej rastrovej bunky alebo palivového modelu.

Cieľom kapitoly je vytvoriť metodický rámec, ktorým sa laboratórne údaje o požiarnych vlastnostiach priradia ku konkrétnym palivovým komponentom a následne prepoja s palivovým profilom, geodatabázou a palivovými modelmi. Takéto prepojenie umožňuje rozlišovať medzi statickou prítomnosťou paliva a jeho aktuálnou dostupnosťou pre zapálenie a horenie. Zároveň zabraňuje tomu, aby sa požiarotechnická vlastnosť stanovená na jednej vzorke bez overenia preniesla na celý druh, palivovú triedu alebo územie.

Kapitola nadväzuje na priestorové odvodenie povrchového, rebríkového a korunového paliva v kapitolách 5 a 6 a na návrh palivových modelov v kapitole 7. Laboratórne údaje tu nevytvárajú náhradu palivového modelu. Predstavujú doplnkovú materiálovú vrstvu, ktorá môže spresniť interpretáciu iniciačného potenciálu, dynamickej dostupnosti paliva a energetického významu jednotlivých komponentov.

8.1. Požiarne vlastnosti paliva ako doplnok priestorového hodnotenia

Priestorová charakteristika paliva a jeho požiarne vlastnosti predstavujú dve odlišné, ale prepojitelné úrovne informácie. Priestorové vrstvy odpovedajú na otázku, kde sa palivo nachádza a akú má štruktúru. Laboratórne skúšky odpovedajú na otázku, ako sa definovaná vzorka správa pri konkrétnych podmienkach tepelného alebo iniciačného namáhania. Obe úrovne sa majú prepájať prostredníctvom jednoznačne identifikovaného palivového komponentu, nie iba prostredníctvom názvu dreviny alebo palivového modelu.

Pre laboratórny záznam sa odporúča evidovať najmenej identifikátor vzorky, identifikátor terénnej plochy alebo zdrojového materiálu, palivovú vrstvu, palivový komponent, živý alebo odumretý stav, veľkostnú triedu, stupeň rozkladu, dátum odberu, spôsob uchovania, spôsob kondicionovania a použitú skúšobnú metódu. Pri každom výsledku sa vedie aj počet opakovaní a základná informácia o variabilite.

Priestorové priradenie laboratórnej hodnoty je prípustné iba v rozsahu, v ktorom možno preukázať zhodu materiálu. Hodnota získaná napríklad z jemného ihličnatého opadu sa nemá priradiť všetkým ihličnatým porastom bez ohľadu na druh, vek opadu, rozklad alebo podiel iných komponentov. Ak mapová bunka obsahuje zmes palivových zložiek, laboratórne vlastnosti sa vedú na úrovni jednotlivých komponentov a ich následné zlučovanie musí mať explicitné pravidlo.

Odporúčané skupiny požiarnych vlastností a ich hlavný interpretačný význam sú uvedené v tabuľke 39.

Tabuľka 39 Skupiny požiarnych vlastností lesného paliva a ich interpretačný význam

Skupina	Príklady parametrov	Primárny význam	Hlavné obmedzenie
Zapáliteľnosť	čas do zapálenia, pravdepodobnosť zapálenia, minimálna účinná expozícia	citlivosť na iniciačný zdroj	silná závislosť od skúšobného usporiadania
Vlhkostný stav	vlhkosť na suchej báze, prípadne na mokrej báze	tepelná záťaž vody a aktuálna dostupnosť paliva	hodnota je časovo premenlivá
Tepelný rozklad	TG, DTG, DSC signál, teplotné intervaly reakcií	strata hmotnosti a termické deje pri definovanom ohreve	nejde o priame meranie správania celého palivového lôžka
Minerálny zvyšok	množstvo popola	nehorľavá anorganická zložka po predpísanom spaľovaní	závisí od metódy a teploty spaľovania
Energetické vlastnosti	spalné teplo, výhrevnosť	energetický potenciál jednotky hmotnosti	nenahrádzajú efektívne teplo uvoľnené pri reálnom požiari
Dohorievanie	čas žeravenia, úbytok hmotnosti po zániku plameňa	trvanie a reziduálne horenie	vyžaduje jasné kritérium ukončenia

8.2. Zapáliteľnosť lesných palív

Zapáliteľnosť vyjadruje schopnosť paliva prejsť pri pôsobení konkrétneho iniciačného alebo tepelného podnetu do udržateľného horenia. Nemá sa redukovať na jednu materiálovú konštantu. Výsledok závisí od druhu iniciačného zdroja, jeho energie alebo tepelného toku, času pôsobenia, vlhkosti paliva, rozmeru častíc, hmotnosti vzorky, hustoty uloženia a prístupu kyslíka. Základné princípy iniciácie pevných palív vychádzajú zo zohrievania, vysušovania, tepelného rozkladu a vzniku horľavých plynných produktov (Drysdale, 2011).

Pri lesných palivách treba odlišovať zapálenie jednotlivého materiálového prvku od zapálenia palivového lôžka. Ihlica, list alebo vetvička skúšaná samostatne má inú tepelnú odozvu než vrstva zložená z mnohých častíc. V palivovom lôžku sa uplatňuje tienenie, kontakt medzi časticami, pórovitosť, prúdenie vzduchu a prenos tepla medzi susednými prvkami. Pri mapovom použití je preto vhodnejšie viazať výsledok na definovaný typ palivovej zložky a spôsob uloženia.

Za základné experimentálne výstupy sa odporúča považovať čas do zapálenia, úspešnosť zapálenia pri opakovaných skúškach, režim zapálenia a podmienky skúšky. Pri skúškach s opakovaním možno pravdepodobnosť úspešného zapálenia pre danú kombináciu podmienok vyjadriť podielom úspešných pokusov. Tento jednoduchý ukazovateľ možno zapísať podľa vzťahu (59).

$$P_{zap} = \frac{n_{zap}}{n} \cdot 100 \quad (59)$$

kde

P_{zap} – podiel úspešných zapálení (%)

n_{zap} – počet pokusov, pri ktorých bolo splnené vopred definované kritérium zapálenia

n – celkový počet porovnateľných opakovaní

Kritérium úspešného zapálenia musí byť stanovené ešte pred skúškou, napríklad ako vznik plameňa s minimálnym trvaním alebo ako samostatne pokračujúce horenie po odstránení iniciačného zdroja.

Pri interpretácii času do zapálenia sa nemá porovnávať výsledok medzi skúškami s rozdielnym tepelným tokom alebo rozdielnym spôsobom iniciácie bez uvedenia týchto podmienok. Kratší čas pri vyššom tepelnom toku neznamena automaticky vyššiu materiálovú zapáliteľnosť v inom skúšobnom režime. V databáze sa preto pri výsledku povinne uchová skúšobný režim.

Termogravimetrické údaje možno použiť ako doplnok pri skúmaní teplotných intervalov rozkladu, ale samotná TGA neurčuje priamo čas zapálenia palivového lôžka. Castells et al. (2021) ukázali možnosti prepájania termogravimetrických charakteristík s odhadom vlastností iniciácie lignocelulózne biomasy; takéto vzťahy však zostávajú modelovým odvodením a vyžadujú samostatné experimentálne overenie.

8.3. Vplyv vlhkosti na iniciáciu a udržanie horenia

Vlhkosť patrí medzi najvýznamnejšie dynamické vlastnosti paliva, pretože voda zvyšuje množstvo energie potrebnej na ohrev materiálu pred začiatkom intenzívneho tepelného rozkladu. Vyššia vlhkosť spravidla predlžuje čas do zapálenia a môže zabrániť udržaniu plameňa, ak tepelný príkon nestačí na súčasné odparovanie vody a prípravu paliva na ďalšie horenie. Tento účinok je však závislý od typu paliva, jeho veľkosti, usporiadania a intenzity iniciačného podnetu (Drysedale, 2011; Melnik et al., 2024).

Vlhkosť sa pri požiarňach skúškach lesného paliva odporúča vyjadrovať na suchej hmotnostnej báze, pretože tento spôsob je bežný v modelovaní paliva a umožňuje priamu väzbu na suchú hmotnosť. Ak sa používa mokrá báza, musí byť spôsob výpočtu zreteľne označený. Vlhkosť na suchej báze možno stanoviť podľa vzťahu (60).

$$M_d = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (60)$$

kde

M_d – vlhkosť paliva na suchej hmotnostnej báze (%)

m_v – hmotnosť vlhkej vzorky

m_s – hmotnosť vzorky po vysušení do konštantnej hmotnosti

Pri laboratórnej analýze sa musí zaznamenať aj teplota sušenia, spôsob určenia konštantnej hmotnosti a čas medzi odberom a prvým vážením.

Norma ISO 18134-3:2023 stanovuje pre analytické vzorky tuhých biopalív postup stanovenia vlhkosti sušením v sušiarňi a upozorňuje na hygroskopickosť jemných biomateriálov. Pre palivové vzorky určené na požiarnotechnické skúšky je dôležité najmä to, aby sa vlhkosť stanovila na materiáli, ktorý je reprezentatívny pre skúšanú vzorku, a čo najbližšie k času skúšky.

Pri mapovaní sa laboratórne stanovená vlhkosť nepovažuje za trvalú vlastnosť palivového komponentu. Do geodatabázy sa zapisuje ako časovo viazaný záznam. Stabilnejšou materiálovou informáciou môže byť až vzťah medzi vlhkosťou a pravdepodobnosťou zapálenia alebo udržania horenia, ak bol odvodený z dostatočného počtu experimentov v definovanom rozsahu podmienok.

8.4. Tepelný rozklad, pyrolýza a horenie rastlinného materiálu

Rastlinný materiál je tvorený najmä lignocelulózovou matricou a ďalšími organickými a minerálnymi zložkami. Pri zahrievaní najskôr dochádza k odparovaniu voľnej a viazanej vody, následne k prekrývajúcim sa procesom tepelného rozkladu hemicelulóz, celulózy, lignínu a extraktívnych látok. Výsledkom je uvoľňovanie plyných a kondenzovateľných produktov a tvorba pevného uhlíkatého zvyšku. Pri prítomnosti kyslíka sa s pyrolýznymi procesmi prekrýva oxidácia.

Pojem pyrolýza sa má používať presne. Označuje tepelný rozklad organického materiálu v neprítomnosti kyslíka alebo pri podmienkach, pri ktorých je oxidačné pôsobenie potlačené. Pri skúške v prúde vzduchu alebo kyslíka ide o oxidačný tepelný rozklad a jeho priebeh nemožno bez vysvetlenia označiť za čistú pyrolýzu. Táto diferenciácia je dôležitá najmä pri porovnávaní výsledkov termickej analýzy.

Plameňové horenie pevného rastlinného paliva prebieha prevažne v plynnej fáze po uvoľnení horľavých produktov tepelného rozkladu. Pevný uhlíkatý zvyšok môže následne oxidovať bez viditeľného plameňa alebo žeravieť. Pomer plameňového a bezplameňového horenia sa mení podľa vlastností materiálu, prístupu kyslíka, tepelného toku a vlhkosti.

Pri interpretácii laboratórnych údajov sa preto odporúča oddeliť najmenej štyri procesné oblasti: odvodnenie, hlavný rozklad prchavých organických zložiek, tvorbu uhlíkatého zvyšku a jeho následnú oxidáciu. Teplotné hranice týchto oblastí sa neurčujú univerzálne; odvodzujú sa z konkrétneho priebehu TG, DTG a DSC pri presne uvedenom skúšobnom režime.

8.5. Termická analýza lesných palív a jej interpretačný význam

Simultánna termická analýza umožňuje pri jednom riadenom teplotnom programe sledovať zmenu hmotnosti vzorky a tepelnú odozvu materiálu. V metodike sa rozlišuje termogravimetria (TG), derivovaná termogravimetria (DTG) a diferenciálna skenovacia kalorimetria (DSC). TG vyjadruje zmenu hmotnosti v závislosti od teploty alebo času, DTG zvýrazňuje rýchlosť zmeny hmotnosti a DSC poskytuje signál súvisiaci s endotermickými a exotermickými dejmi.

Pri opise výsledkov sa má používať termín „DSC signál“, prípadne presnejšie pomenovanie konkrétnej meranej veličiny podľa použitého prístroja a kalibrácie. DSC signál sa nesmie označovať ako rýchlosť uvoľňovania tepla pri požiari. Malá laboratórna vzorka v téglíku a kontrolovaný teplotný program nereprodukuje prenos tepla, prúdenie a geometriu reálneho palivového lôžka.

Porovnávanie rôznych palivových komponentov vyžaduje rovnakú prípravu vzorky, podobnú veľkosť častíc, porovnateľnú hmotnosť, rovnaký typ téglíka, atmosféru, prietok plynu, rýchlosť ohrevu a teplotný rozsah. Zmena rýchlosti ohrevu môže posúvať teplotu maxima DTG alebo DSC a meniť zdanlivý priebeh rozkladu. Preto sa výsledky z rozdielnych protokolov nemajú zlučovať do jednej referenčnej hodnoty bez metodického posúdenia.

Z termickej analýzy možno pre databázu odvodiť najmä počiatočnú stratu hmotnosti súvisiacu s vodou a ľahko prchavými zložkami, teplotu začiatku výraznejšieho rozkladu podľa vopred definovaného kritéria, teplotu maxima DTG, počet alebo rozsah dominantných rozkladových oblastí, zvyškovú hmotnosť pri definovanej teplote a charakter DSC signálu. Kinetické parametre sa zapisujú iba vtedy, ak boli odvodené vhodnou metódou a je uvedený model alebo bez modelový postup.

Termická analýza lesných palív je využiteľná na porovnanie mechanizmu a teplotného priebehu rozkladu, nie ako samostatný dôkaz terénnej zapáliteľnosti. Krieger et al. (2022) použili termogravimetrické a kalorimetrické údaje na odvodenie kinetických parametrov a tepla reakcií lesných palív, čo dokumentuje hodnotu týchto metód pre modelovanie termického rozkladu.

8.6. Množstvo popola, spalné teplo a výhrevnosť paliva

Množstvo popola vyjadruje podiel anorganického zvyšku, ktorý zostane po spaľovaní vzorky za predpísaných podmienok. Nejde o podiel uhľikátého zvyšku po pyrolýze. Pri porovnávaní výsledkov sa musí zachovať rovnaká teplota, časový režim a spôsob prípravy vzorky. Pre tuhé biopalivá stanovuje ISO 18122:2022 štandardizovanú metódu určenia množstva popola.

Ak sa množstvo popola vyjadruje vzhľadom na suchú hmotnosť analyzovanej vzorky, možno ho zapísať podľa vzťahu (61).

$$A_d = \frac{m_a}{m_s} \cdot 100 \quad (61)$$

kde

A_d – množstvo popola na suchej báze (%)

m_a – hmotnosť minerálneho zvyšku po predpísanom spaľovaní

m_s – suchá hmotnosť analyzovanej vzorky pred spaľovaním

Pri praktickej skúške sa presný výpočet vykonáva podľa použitej normy vrátane korekcií na hmotnosť nádoby a skúšobného postupu.

Energetický obsah paliva sa má terminologicky rozlišovať na spalné teplo a výhrevnosť. ISO 18125:2017 stanovuje bombovo-kalorimetrický postup na určenie spálneho tepla tuhého biopaliva pri konštantnom objeme a uvádza aj výpočty výhrevnosti. Spalné teplo zahŕňa tepelný účinok pri kondenzácii vody v produktoch spaľovania, zatiaľ čo výhrevnosť zodpovedá podmienkam, pri ktorých voda odchádza ako para.

Spalné teplo alebo výhrevnosť suchej laboratórnej vzorky sa nesmú bez korekcie používať ako efektívne teplo horenia v reálnom lesnom požiari. Reálne využiteľná energia je ovplyvnená vlhkosťou, neúplným spaľovaním, podielom paliva, ktorý sa skutočne spotrebuje v aktívnej zóne, a tepelnými stratami. Laboratórna energetická hodnota je preto materiálovým vstupom, nie priamym výstupom požiarného správania.

Pri databázovom ukladaní sa samostatne uvádza názov veličiny, hmotnostná báza, jednotka, skúšobná norma a stav vzorky. Pojmy spalné teplo, výhrevnosť a teplo uvoľnené pri konkrétnej požiarnej skúške sa nesmú používať ako vzájomné synonymá.

8.7. Kritické hodnoty vlhkosti vo vzťahu k zapáliteľnosti

Pri hodnotení vlhkosti je potrebné vyhnúť sa predstave jednej univerzálnej „kritickej vlhkosti“ pre určitú drevinu alebo typ lesa. Hranica, pri ktorej sa zapálenie alebo udržanie horenia stáva málo pravdepodobným, závisí od palivového komponentu, veľkosti a tvaru častíc, hustoty uloženia, iniciačného zdroja, tepelného toku, vetra a od definície úspešného zapálenia. Experimentálne výsledky preto majú byť viazané na konkrétny skúšobný protokol.

Melnik et al. (2024) pri porovnaní živej a odumretej vegetácie preukázali, že na horľavosť súčasne vplývajú stav paliva, obsah vody a veľkosť častíc. To podporuje metodický princíp, podľa ktorého sa hodnoty vlhkosti nemajú prenášať medzi rozdielnymi palivovými komponentmi bez overenia.

Pre potreby monografie sa odporúča namiesto jednej absolútnej hranice určovať experimentálne prechodové pásmo. V jeho dolnej časti je zapálenie pri definovanom zdroji spravidla úspešné, v hornej časti spravidla neúspešné a medzi nimi sa nachádza interval premenlivej odozvy. Ak je počet opakovaní dostatočný, možno vzťah medzi vlhkosťou a pravdepodobnosťou zapálenia modelovať logistickou funkciou. Výsledkom potom nie je iba jedna hranica, ale celá krivka pravdepodobnosti s intervalom neistoty.

Pre kartografické použitie sa takto odvodený materiálový vzťah nesmie zamieňať s vlhkosťou vyhasnutia používanou v štandardných palivových modeloch. Vlhkosť vyhasnutia je modelový parameter konkrétneho systému povrchového šírenia, zatiaľ čo experimentálna hranica zapáliteľnosti je výsledok skúšok konkrétneho paliva a konkrétneho iniciačného režimu.

8.8. Rozdiely medzi druhmi a zložkami lesného paliva

Rozdiely v požiarnych vlastnostiach medzi drevinami a palivovými komponentmi sa majú hodnotiť na úrovni skutočne skúšaného materiálu. Výsledok získaný z ihličia nemožno automaticky použiť aj pre kôru, jemné vetvičky alebo drevo rovnakého druhu. Rovnako listový opad, čerstvé listy a rozložená hrabanka predstavujú materiály s rozdielnou štruktúrou, chemickým zložením, obsahom minerálnych látok a vlhkosťou odozvy.

Pri medzidruhovom porovnaní je nevyhnutné odstrániť metodické rozdiely, ktoré by mohli vytvárať zdanlivý druhový účinok. Vzorky sa preto pripravujú a skúšajú rovnakým protokolom a výsledky sa vyhodnocujú pri porovnateľnej vlhkosti alebo s vlhkosťou zahrnutou ako vysvetľujúcou premennou. Samostatne sa zaznamenáva rozmer častíc, stupeň rozkladu a podiel nečistôt.

Kvantitatívne rozdiely medzi priemernými hodnotami sa nemajú interpretovať iba podľa poradia druhov. Potrebné je uviesť variabilitu, počet opakovaní a výsledok štatistického porovnania primeraného experimentálnemu dizajnu. Ak sú rozdiely malé vzhľadom na vnútro druhovú variabilitu, vytváranie samostatných databázových tried nemusí byť odôvodnené.

Odporúčaný spôsob väzby laboratórnej vzorky na mapovaný palivový komponent je uvedený v tabuľke 40.

Tabuľka 40 Väzba laboratórneho hodnotenia na mapované palivové komponenty

Mapovaný komponent	Laboratórna jednotka	Odporúčané vlastnosti	Podmienka prenosu do priestoru
Jemný ihličnatý alebo listnatý opad	reprezentatívna zmes definovanej vrstvy	vlhkosť, zapáliteľnosť, TG/DTG/DSC, popol, energetické vlastnosti	zhoda druhu/zmesi, stavu a stupňa rozkladu
Suchá bylinná zložka	steblá a listy definovanej fenologickej fázy	vlhkosť, zapáliteľnosť, čas horenia	zhoda obdobia a podielu odumretého materiálu
Živá bylinná a krovinná zložka	definované orgány a veľkostné triedy	vlhkosť, zapáliteľnosť, energetické vlastnosti	časová zhoda a rovnaký rastlinný orgán

Mapovaný komponent	Laboratórna jednotka	Odporúčané vlastnosti	Podmienka prenosu do priestoru
Jemné drevné palivo	vetvičky definovaného priemeru	vlhkosť, zapáliteľnosť, TG/DTG/DSC, energetické vlastnosti	rovnaká veľkostná trieda a stav rozkladu
Hrubšie ležiace drevo	drevo definovaného druhu a stupňa rozkladu	vlhkosť, popol, energetické vlastnosti, žeravenie	neprenášať na jemné palivo ani bez rozlíšenia rozkladu
Jemné korunové palivo	ihličie/listy a jemné vetvičky podľa definície dostupného paliva	vlhkosť, termický rozklad, energetické vlastnosti	zhoda definície korunového paliva použitej v modeli

8.9. Prepojenie laboratórnych údajov s palivovým profilom a palivovými modelmi

Laboratórne údaje sa prepájajú prednostne s palivovým profilom, nie priamo s kódom štandardného palivového modelu. Palivový profil obsahuje identifikované zložky a ich množstvo, kým palivový model je účelové zjednodušenie určené pre konkrétny výpočtový systém. Rovnaký model môže v rozdielnych regiónoch zastupovať palivové lôžka s podobnou funkciou pri šírení, ale s odlišným botanickým alebo materiálovým zložením.

Pre každý dominantný alebo významný palivový komponent sa v geodatabáze odporúča viesť identifikátor laboratórneho profilu. Profil obsahuje súbor výsledkov zo skúšok, ich metodiku, referenčnú vlhkosť a rozsah platnosti. Palivový model potom môže na laboratórny profil odkazovať, ale nemení jeho pôvodné hodnoty.

Nie všetky laboratórne parametre vstupujú priamo do Rothermelovho alebo iného štandardného modelu. Spalné teplo možno použiť pri kontrole alebo národnom spresnení energetického parametra, zatiaľ čo TG/DTG/DSC slúžia predovšetkým na materiálovú interpretáciu termického rozkladu. Kritická experimentálna vlhkosť zapálenia sa zase nemá bez preukázania zamieňať s modelovou vlhkosťou vyhasnutia.

Takéto oddelenie umožňuje aktualizovať laboratórnu databázu bez prepisovania palivového modelu a naopak. Ak nový experiment preukáže odlišnú požiaru vlastnosť určitého palivového komponentu, zmení sa jeho laboratórny profil a následne sa posúdi, či táto zmena ovplyvňuje konkrétny modelovací alebo hodnotiaci krok.

Odporúčaná dátová väzba je zhrnutá v tabuľke 41.

Tabuľka 41 Odporúčaná väzba laboratórnych údajov na palivový profil a model

Úroveň	Príklad obsahu	Spôsob prepojenia	Úloha
Vzorka	id_vzorky, komponent, druh, veľkostná trieda, vlhkosť	väzba na id_plochy alebo zdrojový materiál	sledovateľnosť experimentu
Laboratórny profil	zapáliteľnosť, TG/DTG/DSC, popol, spalné teplo, výhrevnosť	id_lab_prof	súbor vlastností konkrétneho palivového komponentu
Palivový profil	množstvo a štruktúra komponentov	kód komponentu + id_lab_prof	materiálová interpretácia mapovanej vrstvy
Palivový model	parametre konkrétneho modelovacieho systému	odkaz na dominantné komponenty	modelovanie správania požiaru

Úroveň	Príklad obsahu	Spôsob prepojenia	Úloha
Dynamický stav	aktuálna vlhkosť a meteorologické podmienky	časovo viazané pripojenie	operačná interpretácia aktuálnej dostupnosti paliva

8.10. Využitie požiarnych vlastností pri hodnotení požiarneho nebezpečenstva a rizika

Požiarne vlastnosti sa majú do hodnotenia požiarneho nebezpečenstva a rizika zaradiť podľa procesu, ktorý opisujú. Zapáliteľnosť a vlhkosťná odozva sú najbližšie procesu iniciácie. Parametre povrchového palivového modelu a jeho množstvo a kontinuita opisujú podmienky šírenia po vzniku požiaru. Energetické vlastnosti a množstvo paliva sa viažu na potenciálny tepelný účinok, ale ich význam závisí od skutočne spotrebovaného podielu paliva.

Laboratórne požiarnotechnické údaje preto nemajú byť zlúčené do jedného všeobecného „indexu horľavosti“ bez fyzikálneho zdôvodnenia. Takýto index by mohol miešať proces iniciácie, rýchlosť šírenia, tepelný rozklad a energetický potenciál a viesť k dvojitému započítaniu rovnakého mechanizmu v neskoršom komplexnom hodnotení.

Pri náchylnosti na vznik požiaru možno použiť materiálovú informáciu o citlivosti dominantného jemného paliva na zapálenie. Pri aktuálnom požiarom nebezpečenstve sa táto informácia kombinuje s časovo aktuálnou vlhkosťou. Pri hodnotení následného správania požiaru sa uplatňujú palivové modely a priestorové parametre z kapitol 5 až 7. Pri zraniteľnosti a dôsledkoch môžu byť energetické vlastnosti významné iba prostredníctvom scenára reálneho horenia, nie samostatne.

Prepojenie medzi laboratórnou veličinou a hodnotiacou zložkou je uvedené v tabuľke 42.

Tabuľka 42 Funkčné použitie laboratórných údajov v ďalšom hodnotení

Laboratórna veličina	Najbližší proces	Možné využitie	Nevhodná interpretácia
Čas / pravdepodobnosť zapálenia	iniciácia	materiálová náchylnosť dominantného jemného paliva	priamy ukazovateľ pravdepodobnosti požiaru bez iniciačného zdroja
Vlhkosť	dostupnosť paliva	aktuálne požiarne nebezpečenstvo	trvalá statická vlastnosť mapy
TG/DTG/DSC	tepelný rozklad	porovnanie termickej odozvy a modelovanie rozkladu	priama rýchlosť šírenia požiaru alebo HRR
Množstvo popola	minerálna zložka	charakterizácia materiálu a zvyškov	samostatný ukazovateľ rizika
Spalné teplo / výhrevnosť	energetický potenciál	modelovanie energie pri definovanom scenári	efektívna energia reálneho čela požiaru bez korekcie
Čas žeravenia	reziduálne horenie	doháranie, opätovné rozhorenie, zásahová náročnosť	ukazovateľ rýchlosti počiatočného šírenia

8.11. Experimentálny protokol, overovanie a ďalší rozvoj databázy požiarnych vlastností

Ďalšie experimentálne overovanie sa má organizovať ako plánovaný databázový program, nie ako súbor izolovaných skúšok. Základom je výber reprezentatívnych palivových komponentov podľa ich plošného významu, funkcie pri požiari a nedostatku existujúcich údajov. Prioritu majú dominantné jemné povrchové palivá, živé a odumreté bylinné a krovinné zložky, významné veľkostné triedy dreveného paliva a jemné korunové palivo.

Každá skúšobná séria má obsahovať dostatočný počet nezávislých biologických alebo terénnych vzoriek a technických opakovaní. Technické opakovanie tej istej homogenizovanej vzorky nenahrádza biologickú alebo priestorovú variabilitu. Pri štatistickom vyhodnotení sa preto musí rozlíšiť variabilita medzi odbermi a variabilita samotnej analytickej metódy.

Prednostne sa navrhuje viacfaktorový experimentálny dizajn, ktorý umožní samostatne posúdiť účinok druhu alebo palivového komponentu, vlhkosti, veľkostnej triedy a skúšobného režimu. Pri zapáliteľnosti je vhodné pracovať s viacerými úrovňami vlhkosti a s opakovanými skúškami, aby bolo možné odhadnúť prechodovú oblasť medzi pravdepodobným a nepravdepodobným zapálením. Pri termickej analýze sa skúšobný režim nemení v rámci porovnáwanej série, ak zmena rýchlosti ohrevu nie je priamo predmetom experimentu.

Kontrola kvality zahŕňa kalibráciu prístrojov, slepé alebo referenčné merania podľa charakteru metódy, kontrolu hmotnosti a vlhkosti vzorky, jednoznačné označenie odberov a uchovanie surových dát. Výsledok sa zapisuje spolu s neistotou alebo aspoň s mierou variability. Surové merania sa neprepisujú pri neskoršom prepočte; nové spracovanie vytvára novú verziu odvodeného výsledku.

Odporúčaný minimálny záznam experimentu je uvedený v tabuľke 43.

Tabuľka 43 Minimálny záznam experimentálneho hodnotenia požiarnych vlastností

Oblasť	Minimálny obsah
Identifikácia	id_vzorky; id_plochy alebo zdroj; palivová vrstva; komponent; druh alebo zmes
Stav materiálu	živý/odumretý stav; veľkostná trieda; stupeň rozkladu; vlhkosť; spôsob kondicionovania
Odber a uchovanie	dátum a čas; spôsob odberu; obal; čas do analýzy; podmienky skladovania
Skúšobný režim	metóda/norma; prístroj; hmotnosť vzorky; geometria; atmosféra; tepelný tok alebo teplotný program
Výsledok	primárna meraná veličina; jednotka; počet opakovaní; priemer/medián podľa charakteru údajov; variabilita
Kvalita	kalibrácia; neplatné merania a dôvod vyradenia; neistota; poznámka k obmedzeniu
Sledovateľnosť	dátum analýzy; zodpovedná osoba/pracovisko; verzia spracovania; väzba na surové údaje

Databáza požiarnych vlastností sa má rozvíjať tak, aby umožňovala porovnanie medzi regiónmi a časom bez straty metodických informácií. Nový výsledok sa nepriradí automaticky k existujúcemu komponentu, ak bola použitá odlišná skúšobná metóda alebo významne odlišný stav materiálu. Zlučovanie je prípustné až po odbornom posúdení porovnateľnosti.

Osobitnú prioritu má experimentálne overenie palív, ktoré v slovenskom prostredí tvoria dominantný nositeľ povrchového šírenia alebo významné rebríkové palivo, a palív charakteristických pre poškodené porasty. Súčasne je potrebné vytvoriť dostatočne široký rozsah vlhkostí, pretože práve prechod od suchej k vlhkej reakcii paliva je rozhodujúci pri prepájaní statickej mapy s dynamickým nebezpečenstvom vzniku požiaru (požiarnym nebezpečenstvom).

Výsledkom kapitoly je metodické prepojenie medzi laboratórnym experimentom a priestorovou databázou. Laboratórny údaj zostáva vlastnosťou definovanej vzorky a skúšobného režimu; do priestoru sa prenáša iba prostredníctvom identifikovaného palivového komponentu a s uvedeným rozsahom platnosti.

9. VYUŽITIE VÝSLEDKOV PRI HODNOTENÍ RIZIKA VZNIKU POŽIARU V LESNOM PROSTREDÍ

Kapitola stanovuje uskutočniteľný a opakovateľný postup priestorového hodnotenia požiarneho rizika v lesnom prostredí. Nadväzuje na terénne zisťovanie a geodatabázu lesného paliva, priestorové vrstvy povrchového, rebrikového a korunového paliva, palivové modely a laboratórne údaje o požiarňoch vlastnostiach. Každý analytický krok je definovaný tak, aby ho bolo možné zopakovať pri rovnakých vstupoch, parametroch a verzii metodiky a aby bolo možné spätne určiť pôvod výslednej hodnoty.

Metodika zámerne oddeľuje proces vzniku požiaru od jeho správania po iniciácii a od dôsledkov na hodnotené prvky. Základnými výstupmi sú: náchylnosť na vznik požiaru, aktuálne nebezpečenstvo vzniku požiaru, aktuálny index rizika vzniku požiaru, potenciál povrchového šírenia požiaru, štruktúrny potenciál vertikálneho prechodu a korunového šírenia, tematická zraniteľnosť, reziliencia (odolnosť) a výsledný index prioritizácie. Termín riziko vzniku požiaru sa v tejto kapitole používa pre iniciačnú zložku hodnotenia; komplexné požiarne riziko zahŕňa aj podmienky šírenia, zraniteľnosť a rezilienciu. Výsledný index prioritizácie je relatívnym rozhodovacím ukazovateľom. Ak nebol kalibrovaný na pozorované pravdepodobnosti a straty, nesmie sa interpretovať ako pravdepodobnosť požiaru ani ako očakávaná finančná alebo ekologická strata.

Základná referenčná konfigurácia používa rovnaké váhy v rámci jednej procesnej skupiny a geometrické alebo nekompenzačné operátory tam, kde majú jednotlivé podmienky pôsobiť súčasne. Tým sa obmedzuje svojvoľné nastavovanie váh. Ak sa neskôr získajú dostatočné validačné údaje, možno referenčnú konfiguráciu nahradiť kalibrovanou verziou; zmena sa však eviduje ako nová verzia modelu a pôvodný výsledok sa zachováva.

Východiskom je chápanie rizika ako výsledku vzájomného pôsobenia nebezpečenstva, expozície, zraniteľnosti a kapacity alebo reziliencie systému (UNDRR, 2017). V oblasti lesných požiarov sa kvantitatívne hodnotenie rizika opiera o oddelené hodnotenie pravdepodobnosti vzniku alebo výskytu požiaru, jeho správania a účinkov na hodnotené zdroje (Finney, 2005; Scott et al., 2013).

9.1. Požiarne riziko v lesnom prostredí a jeho zložky

Základnou pracovnou priestorovou jednotkou je rastrová bunka. Odporúčaná technická mriežka má veľkosť 10 × 10 m, pretože umožňuje jednotné prekrytie vrstiev z predchádzajúcich kapitol. Táto veľkosť bunky však nie je automaticky informačným rozlíšením. Pri každej vrstve sa uchováva pôvodná priestorová podpora a údaj o tom, či hodnota vznikla meraním, odvodením, modelovaním alebo klasifikačným priradením.

Základnou jednotkou lesníckej interpretácie je JPRL. Analýza sa vykonáva na pracovnej mriežke a výsledky sa následne agregujú na JPRL. Pri JPRL sa povinne ukladajú najmenej medián, priemer, 90. percentil, maximálna hodnota po kontrole extrémov, plošný podiel buniek v dvoch najvyšších triedach, podiel buniek s platným údajom a podiel buniek označených ako extrapolované alebo s nízkou dátovou podporou.

Pre časové porovnávanie sa zavedie referenčné obdobie a referenčný dátový súbor. Všetky percentily používané na normalizáciu sa vypočítajú raz z referenčného súboru a uložia sa medzi parametre modelu.

Pri neskoršej aktualizácii sa hranice neprepočítavajú, pokiaľ sa nevytvára nová verzia metodiky. Tým sa zabezpečí, že zmena indexu medzi rokmi vyjadruje zmenu vstupov a nie zmenu normalizačnej škály.

Povinné výsledné vrstvy, ich význam, rozsah hodnôt a režim aktualizácie sú zhrnuté v tabuľke 44.

Tabuľka 44 Povinné výsledné vrstvy a ich význam

Kód vrstvy	Význam	Rozsah	Režim aktualizácie
S_vznik	dlhodobejšia náchylnosť na vznik požiaru	0-1	po zmene statických vstupov alebo novej verzii modelu
H_akt	aktuálne nebezpečenstvo vzniku požiaru	0-1	denne alebo podľa časového kroku vstupov
I_vznik	aktuálny index rizika vzniku požiaru	0-1	s každou aktualizáciou H_akt
I_pov	potenciál povrchového šírenia požiaru	0-1	pre každý meteorologický/scenárový stav
I_kor	štruktúrny potenciál vertikálneho prechodu a korunového šírenia	0-1	po zmene porastovej štruktúry
V_s	zraniteľnosť pre scenár s	0-1	podľa aktualizácie hodnotených prvkov
R_s	reziliencia pre scenár s	0-1	pomaly premenlivá
P_s	priorizačný index pre scenár s	0-1	po aktualizácii ktorejkoľvek zložky
Q_dat	kvalita údajov a dátovej podpory	0-1 alebo trieda	s každou zmenou vstupov
U_vys	neistota výsledku	číselná hodnota, interval alebo trieda	s každou zmenou vstupov alebo modelu

9.2. Náchylnosť lesného prostredia na vznik požiaru

Referenčná metodika náchylnosti používa tri procesné zložky: palivovú predispozíciu „F_pal“, antropogénnu predispozíciu „F_ant“ a dlhodobejšiu klimatickú predispozíciu „F_klim“. Historické požiare sa v referenčnej konfigurácii nepoužívajú ako ďalší plnohodnotný vstup, aby sa tie isté udalosti nepoužili súčasne na zostavenie aj overenie modelu. Slúžia predovšetkým na kalibráciu, validáciu a prípadné odvodenie parametrov vzdialenostnej funkcie.

Palivová predispozícia sa vypočíta z množstva jemného povrchového paliva a jeho horizontálnej kontinuity. Obe veličiny sa najskôr prevedú na škálu 0-1 podľa normalizačného postupu v podkapitole 9.6. Ak jedna z povinných veličín chýba, „F_pal“ sa nevypočíta a bunka dostane hodnotu „NoData“ pre referenčný index „S_vznik“.

Antropogénna predispozícia sa vytvorí z vrstvy potenciálnych antropogénnych iniciačných zdrojov. V jednej analýze sa musí použiť vopred definovaný a verziovaný zoznam kategórií, napríklad verejné komunikácie, zastavané územie, rekreačné body a ďalšie činnosti, pre ktoré existuje vecné zdôvodnenie. Pre každú bunku sa vypočíta euklidovská alebo sieťová vzdialenosť podľa povahy zdroja. Ak sú kategórie viaceré, najskôr sa vytvoria samostatné vzdialenostné vrstvy a až potom sa integrujú.

Dlhodobá klimatická predispozícia sa odporúča odvodiť z dlhodobého počtu dní s vysokým požiarnym nebezpečenstvom alebo z inej stabilnej klimatickej charakteristiky presychania. Musí sa použiť

klimatologické obdobie s rovnakou dĺžkou pre celé hodnotené územie. Aktuálny denný index požiarneho nebezpečenstva (FWI – Fire Weather Index) alebo aktuálna vlhkosť sem nevstupujú; patria do „H_akt“.

Povinné faktory referenčného indexu náchylnosti, ich zdroj, smer pôsobenia a spôsob spracovania sú uvedené v tabuľke 45.

Tabuľka 45 Povinné faktory referenčného indexu náchylnosti

Faktor	Zdroj v metodike	Smer	Spracovanie
množstvo jemného paliva	kapitola 5; mnoz_jem	rastúci	robustná normalizácia $N_{\uparrow}$
horizontálna kontinuita	kapitola 5; spojit_pov	rastúci	pri spojitkej hodnote $N_{\uparrow}$; pri triede prevod 1–5 na 0–1
vzdialenosť od antropogénneho iniciačného zdroja	GIS vzdialenostná analýza	klesajúci	$N_{\downarrow}$ alebo kalibrovaná vzdialenostná funkcia
dlhodobá klimatická predispozícia	referenčný klimatický súbor	rastúci	$N_{\uparrow}$ voči fixnej referenčnej distribúcii

Palivová predispozícia sa stanoví ako geometrický priemer normalizovaného množstva jemného paliva a normalizovanej horizontálnej kontinuity. Geometrický priemer je zvolený preto, aby veľmi nízka hodnota jednej podmienky nemohla byť úplne kompenzovaná vysokou hodnotou druhej. Výpočet sa vykoná podľa vzťahu (62):

$$F_{pal} = (N_{mnoz} \cdot N_{spoj})^{1/2} \quad (62)$$

kde

F_{pal} – palivová predispozícia,

N_{mnoz} – normalizované množstvo jemného paliva

N_{spoj} – normalizovaná horizontálna kontinuita.

Obe vstupné hodnoty musia byť v intervale 0–1.

Výsledná náchylnosť na vznik požiaru sa v referenčnej konfigurácii určí geometrickým priemerom troch procesných zložiek podľa vzťahu (63):

$$S_{vznik} = (F_{pal} \cdot F_{ant} \cdot F_{klim})^{1/3} \quad (63)$$

kde

S_{vznik} – index náchylnosti,

F_{pal} – palivová predispozícia,

F_{ant} – antropogénna predispozícia

F_{klim} – dlhodobá klimatická predispozícia.

Matematicky ide o tretiu odmocninu zo súčinu troch zložiek. Všetky tri zložky sú v referenčnom režime povinné. Ak sa niektorá z nich nepoužije, výsledok sa musí označiť iným kódom modelu a nesmie sa porovnávať s referenčným S_{vznik} ako totožný produkt.

9.3. Nebezpečenstvo vzniku požiaru v lesnom prostredí

Aktuálne nebezpečenstvo sa počíta v jednom z dvoch režimov. Režim FM používa priamo meranú alebo modelovanú vlhkosť iniciačne významného jemného paliva. Režim FWI používa harmonizovaný index požiarneho počasia. Oba režimy sa neintegrujú do jednej hodnoty, pretože FWI už obsahuje meteorologickú informáciu súvisiacu s vysušovaním paliva a ich súčasné použitie by mohlo viesť k dvojitému započítaniu rovnakého mechanizmu.

V režime FM sa pre každú bunku použije vlhkosť palivového komponentu, ktorý bol v kapitole 5 určený ako dominantný nositeľ iniciácie a povrchového šírenia. Ak je k dispozícii experimentálne kalibrovaná krivka pravdepodobnosti zapálenia podľa kapitoly 8, použije sa táto krivka. Ak nie je k dispozícii, vlhkosť sa transformuje klesajúcou robustnou normalizáciou voči fixnému referenčnému rozsahu a výsledok sa označí ako relatívny index dostupnosti paliva, nie ako pravdepodobnosť zapálenia.

V režime FWI sa použije FWI alebo jeho vybraná zložka podľa cieľa analýzy. Zvolený index sa musí uviesť v metadátoch. Systém FWI vychádza z meteorologických vstupov a kódov vlhkosti paliva (Van Wagner, 1987); pri európskom porovnávaní sa používa aj v rámci EFFIS. Pri jednej časovej sérii sa musí zachovať rovnaký zdroj, čas pozorovania a postup priestorovej interpolácie.

Oba povolené režimy výpočtu aktuálneho nebezpečenstva, vrátane ich povinných vstupov, transformačných pravidiel a výsledných veličín, sú porovnané v tabuľke 46.

Tabuľka 46 Režimy výpočtu „H_{akt}“

Režim	Povinný vstup	Transformácia	Výstupný kód	Poznámka
FM	vlhkosť dominantného jemného paliva	kalibrovaná krivka zapálenia alebo $N_{\downarrow}$	H _{FM}	preferovaný pri dostupnej palivovej vlhkosti
FWI	FWI alebo vopred určená zložka systému	$N_{\uparrow}$ voči fixnému referenčnému obdobiu	H _{FWI}	nepridávať súčasne tú istú vlhkosťnú informáciu

V režime FM bez kalibrovanej krivky sa aktuálne nebezpečenstvo (H_{FM}) rovná normalizovanému ukazovateľu suchosti jemného paliva podľa vzťahu (64):

$$H_{FM} = N_{\downarrow}(M_{jem}) \quad (64)$$

kde

M_{jem} – aktuálna vlhkosť dominantného jemného paliva

$N_{\downarrow}$ – klesajúca normalizačná funkcia podľa podkapitoly 9.6.

V režime FWI sa analogicky použije rastúca normalizácia zvoleného indexu.

Aktuálny index rizika vzniku požiaru spája stabilnejšiu náchylnosť a aktuálny stav paliva alebo požiarneho počasia. Keďže obe podmienky musia pôsobiť súčasne, použije sa násobný vzťah (65):

$$I_{vznik} = S_{vznik} \times H_{akt} \quad (65)$$

kde

I_{vznik} – aktuálny index rizika vzniku požiaru,

S_{vznik} – náchylnosť

H_{akt} – výstup z presne jedného povoleného režimu aktuálneho nebezpečenstva.

Hodnota zostáva relatívnym indexom 0-1, pokiaľ nebola kalibrovaná na nezávislom súbore zaznamenaných vzniknutých požiarov.

9.4. Zraniteľnosť lesného prostredia voči účinkom požiaru

Zraniteľnosť sa nepočíta ako jedna univerzálna vlastnosť územia. Vytvára sa samostatne pre konkrétny hodnotený cieľ. Referenčná metodika rozlišuje najmenej ekologický, pôdno-hydrologický, hospodársky a infraštruktúro-spoločenský scenár. Každý scenár má vlastný súbor vstupov a výsledný kód „V_eko“, „V_poda“, „V_hosp“ alebo „V_infra“.

V každom scenári sa vstupné indikátory najskôr premenia na škálu 0-1. Pri spojitých veličinách sa použije robustná normalizácia; pri usporiadaných kategóriách sa použije pevný prevod tried 1-5 na hodnoty 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00. Kategórie bez prirodzeného poradia sa nesmú mechanicky prevádzať na číselnú škálu; musia mať vopred zdokumentované skóre odvodené z odborného hodnotenia alebo empirických účinkov.

Ak scenár obsahuje viac indikátorov rovnakej procesnej úrovne a nie sú k dispozícii kalibrované váhy, použije sa ich aritmetický priemer s rovnakou váhou. Vždy sa uchováva aj jednotlivé indikátory a dominantná zložka, aby výsledné skóre zostalo vysvetliteľné.

Minimálny súbor indikátorov jednotlivých referenčných scenárov zraniteľnosti a spôsob ich použitia sú uvedené v tabuľke 47.

Tabuľka 47 Referenčné scenáre zraniteľnosti

Scenár	Minimálne indikátory	Výstup	Použitie
ekologický	citlivosť biotopu/druhu; ochranný význam; očakávaná citlivosť na závažnosť požiaru	V_eko	ochrana prírody a biologických funkcií
pôdno-hydrologický	erózna citlivosť; sklon; stabilita pôdy; význam pre vodný režim	V_poda	ochrana pôdy a vôd
hospodársky	hodnota porastu; obnova; produkčný význam	V_hosp	lesné hospodárstvo
infraštruktúro-spoločenský	exponované objekty; komunikácie; technická infraštruktúra; rekreačné využitie	V_infra	ochrana majetku, dostupnosti a osôb

Pre scenár s počtom k platných indikátorov sa referenčná zraniteľnosť vypočíta podľa vzťahu (66):

$$V_s = \frac{1}{k} \sum v_j \quad (66)$$

kde

V_s – zraniteľnosť pre scenár s,

v_j – normalizovaný indikátor

k – počet povinných indikátorov daného scenára.

V referenčnom režime musia byť prítomné všetky indikátory uvedené ako povinné v konfiguračnom súbore konkrétneho scenára.

9.5. Reziliencia lesných ekosystémov po požiari

Reziliencia sa rovnako viaže na konkrétnu funkciu. Ekologická reziliencia sa nesmie zamieňať s organizačnou kapacitou zásahu. Pre každý scenár zraniteľnosti sa preto vytvorí zodpovedajúca rezilienčná vrstva, ak je jej zahrnutie vecne opodstatnené.

Pri ekologickom scenári možno hodnotiť schopnosť prirodzenej obnovy, dostupnosť zdrojov regenerácie, stanovištnú vhodnosť, konektivitu a štruktúrnú heterogenitu. Koontz et al. (2020) poukázali na význam lokálnej štruktúrnej variability pre odolnosť suchých ihličnatých lesov voči požiaru. Prenos konkrétnych prahov do slovenských podmienok však vyžaduje overenie; v metodike sa preto používajú iba normalizované lokálne indikátory.

Výsledný index reziliencie R_s má smer 0 = veľmi nízka schopnosť obnovy a 1 = vysoká schopnosť obnovy. Pre neskoršiu priorizáciu sa používa faktor nízkej reziliencie podľa vzťahu (67).

$$L_s = 1 - R_s \quad (67)$$

kde

L_s – faktor nízkej reziliencie

R_s – normalizovaný index reziliencie pre daný scenár.

Ak pre scenár nie je možné rezilienciu odborne stanoviť, L_s sa nevypĺňa a výsledok sa uvádza bez rezilienčnej korekcie; nesmie sa nahradiť nulou.

9.6. Vstupné faktory, harmonizácia a normalizácia

Každá vstupná vrstva musí pred použitím prejsť kontrolou názvu veličiny, jednotky, súradnicového systému, priestorovej podpory, dátumu platnosti, rozsahu hodnôt, výskytu údajov NoData, pôvodu a verzie. Kontrola sa zapisuje do protokolu spracovania. Ak chýba povinný metadátový údaj, vrstva sa nepoužije v referenčnej analýze, kým sa pôvod neoverí.

Všetky vrstvy sa prevedú na spoločný rozsah územia a technickú mriežku. Pri kategorizovaných údajoch sa používa metóda najbližšieho suseda alebo iné pravidlo zachovávajúce triedu. Pri spojitých údajoch sa interpolácia používa iba vtedy, ak je vecne oprávnená. Prevzorkovanie na 10 m nevytvára 10 m informačné rozlíšenie; pôvodné rozlíšenie sa uchová v atribúte „podpora_dat“.

Pre spojité veličiny s rastúcim vzťahom k hodnotenej zložke sa v referenčnej metodike používa robustná lineárna normalizácia medzi 5. a 95. percentilom referenčného súboru. Hodnoty pod dolnou hranicou sa nastavujú na 0 a nad hornou hranicou na 1. Výpočet sa vykoná podľa vzťahu (68):

$$N_{\uparrow}(x) = clip\left[\frac{x - q_{05}}{q_{95} - q_{05}}, 0, 1\right] \quad (68)$$

kde q_{05} a q_{95} sú 5. a 95. percentil z pevne uloženého referenčného dátového súboru. Funkcia *clip* obmedzí výsledok na interval 0–1. Percentily sa pri bežnej aktualizácii neprepočítavajú.

Pri veličine s klesajúcim vzťahom sa použije vzťah (69):

$$N_{\downarrow}(x) = 1 - N_{\uparrow}(x) \quad (69)$$

Ak $q_{05} = q_{95}$ alebo ak je viac než 20 % referenčných buniek NoData, normalizácia sa zastaví a faktor sa označí na kontrolu. Pre usporiadané triedy 1-5 sa použije pevné skóre 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00. Všetky iné transformačné funkcie musia byť uložené v konfiguračnej tabuľke modelu a nesmú sa meniť počas jedného hodnotiaceho obdobia.

Na zabezpečenie opakovateľnosti analýzy sa pre každý vstupný faktor vytvára konfiguračný záznam. Jeho povinný obsah je uvedený v tabuľke 48.

Tabuľka 48 Povinný konfiguračný záznam každého faktora

Pole	Obsah
kod_fakt	jednoznačný kód vstupného faktora
zdroj	dátový zdroj a verzia
jednotka	fyzikálna alebo kategorizovaná jednotka
smer	rastúci / klesajúci / kategorizovaný
transform	$N_{\uparrow}$ / $N_{\downarrow}$ / pevná tabuľka / kalibrovaná funkcia
q_{05} , q_{95}	fixné referenčné parametre pri robustnej normalizácii
povinnosť	povinný / voliteľný; v referenčných indexoch sú jadrové faktory povinné
cas_plat	čas platnosti vstupu
podpora_dat	skutočná priestorová podpora
verzia	verzia transformačného pravidla

9.7. Využitie údajov o palive pri hodnotení šírenia požiaru

Potenciál povrchového šírenia požiaru sa v referenčnej metodike neodvodzuje novým váženým súčtom palivových charakteristík, ak je k dispozícii výstup z modelu správania požiaru definovaného v kapitole 7. Použije sa modelovaná rýchlosť šírenia povrchového požiaru pri presne uvedenom palivovom modeli, vlhkosti, vetre a sklone. Tým sa zachová fyzikálna väzba medzi palivovými parametrami a správaním požiaru.

Rýchlosť šírenia sa normalizuje rastúcou funkciou $N_{\uparrow}$ voči referenčnému rozsahu modelovaných rýchlostí. Výstup I_{pov} predstavuje relatívny index potenciálu povrchového šírenia požiaru. Intenzita na čele (fronte) požiaru a dĺžka plameňa sa ukladajú ako samostatné sprievodné veličiny, nie ako ďalšie nezávislé faktory do rovnakého indexu, pretože sú s rýchlosťou šírenia a palivovým vstupom procesne previazané.

Referenčný výpočet je uvedený vo vzťahu (70):

$$I_{pov} = N_{\uparrow}(R_{pov}) \quad (70)$$

kde

R_{pov} – modelovaná rýchlosť povrchového šírenia pri konkrétnom scenári

I_{pov} – normalizovaný index 0–1.

Scenár musí mať samostatný identifikátor obsahujúci dátum alebo definované meteorologické podmienky.

Potenciál vertikálneho prechodu a korunového šírenia sa vyhodnocuje samostatne od modelovanej rýchlosti povrchového šírenia. Cieľom nie je nahradiť model korunového požiaru, ale vytvoriť priestorovo opakovateľný ukazovateľ štruktúrnej predispozície. Používajú sa štyri parametre z kapitoly 6: výška korunovej bázy, vertikálna kontinuita rebríkového paliva, objemová hustota korunového paliva a horizontálna kontinuita korún.

Najprv sa vypočíta zložka iniciácie korún K_{init} ako geometrický priemer klesajúcej normalizácie výšky korunovej bázy a rastúcej normalizácie vertikálnej kontinuity. Zložka udržania korunového šírenia K_{maint} sa vypočíta ako geometrický priemer normalizovanej objemovej hustoty korunového paliva a horizontálnej kontinuity korún. Výsledný I_{kor} je geometrickým priemerom oboch zložiek. Ak na lokalite korunová vrstva objektívne chýba, $I_{kor}=0$; ak údaje o korunovej vrstve chýbajú, výsledok je NoData.

Zložka iniciácie korún, zložka udržania korunového šírenia a výsledný štruktúrny potenciál vertikálneho prechodu a korunového šírenia sa vypočítajú podľa vzťahov (71) až (73):

$$K_{init} = (N_{CBH} \times N_{rebr})^{1/2} \quad (71)$$

$$K_{maint} = (N_{CBD} \times N_{kor})^{1/2} \quad (72)$$

$$I_{kor} = (K_{init} \times K_{maint})^{1/2} \quad (73)$$

N_{CBH} je klesajúco normalizovaná výška korunovej bázy, N_{rebr} je normalizovaná vertikálna kontinuita rebríkového paliva, N_{CBD} normalizovaná objemová hustota korunového paliva a N_{kor} normalizovaná horizontálna kontinuita korún. Tento index je štruktúrny. Pri operačnej predpovedi prechodu do korún sa má uprednostniť validovaný výpočtový postup založený na intenzite povrchového požiaru, výške korunovej bázy a vlhkosti korunového paliva podľa modelového rámca Van Wagnera a Scott a Reinhardt (2001).

Pre prioritizačné mapovanie sa povrchový a korunový potenciál nespriemerujú, pretože nízky korunový potenciál nemá znižovať vysoký potenciál rýchleho povrchového šírenia a naopak. Použije sa nekompenzačný operátor maxima podľa vzťahu (74):

$$I_{sir} = \max(I_{pov}, I_{kor}) \quad (74)$$

Kde I_{sir} vyjadruje vyšší z dvoch relevantných mechanizmov šírenia. Spolu s ním sa povinne uchováva I_{pov} a I_{kor} , aby bolo možné určiť dominantný mechanizmus. V odbornom výstupe sa nesmie uvádzať iba I_{sir} bez jeho rozkladu.

9.8. Integrácia čiastkových zložiek do komplexného hodnotenia

Komplexné hodnotenie sa vykonáva samostatne pre každý scenár zraniteľnosti. Nevytvára sa jedna univerzálna vrstva, ktorá by spájala ekologické, hospodárske a infraštruktúrne hodnoty do jedného nerozlíšeného čísla. Výsledkom sú minimálne P_{eko} , P_{poda} , P_{hosp} a P_{infra} , ak sú pre dané územie dostupné príslušné vstupy.

Základný prioritizačný index pred zahrnutím reziliencie sa vypočíta ako geometrický priemer aktuálneho indexu rizika vzniku požiaru I_{vznik} , potenciálu šírenia I_{sir} a zraniteľnosti V_s . Geometrický priemer obmedzuje kompenzáciu a zabezpečuje, že veľmi nízka hodnota jednej procesnej zložky znižuje výsledný index prioritizácie. Všetky tri zložky sú povinné.

Výpočet sa vykoná podľa vzťahu (75):

$$P_{0,s} = (I_{vznik} \cdot I_{sir} \cdot V_s)^{1/3} \quad (75)$$

kde

$P_{0,s}$ – základný index prioritizácie pre scenár s .

Ak sa používa aj reziliencia, nevkladá sa do základného indexu ako ďalšia rovnocenná podmienka. Vytvorí sa samostatný index priority obnovy $P_{obn,s}$ podľa vzťahu (76):

$$P_{obn,s} = (P_{0,s} \cdot L_s)^{1/2} \quad (76)$$

$P_{obn,s}$ zvyrazňuje územia, v ktorých sa vysoká požiarna priorita spája s nízkou schopnosťou obnovy. Ak L_s nie je dostupné, $P_{obn,s}$ sa nevypočíta; $P_{0,s}$ zostáva plnohodnotným základným výstupom.

Spojité hodnoty 0-1 je primárnym analytickým výstupom. Päťstupňová trieda sa vytvára iba ako prezentačná a rozhodovacia vrstva. V referenčnej verzii sa hranice tried určia z pevnej referenčnej distribúcie a následne sa nemenia počas časového porovnávania. Odporúča sa uložiť hranice do konfiguračnej tabuľky a nepoužívať automatické prepočítanie kvantilov pri každom novom dátume.

Ak nie je k dispozícii validovaná väzba na účinky, triedy sa pomenúvajú neutrálne: veľmi nízka, nízka, stredná, vysoká a veľmi vysoká relatívna priorita. Nepoužívajú sa formulácie typu „pravdepodobnosť 80 %“ bez pravdepodobnostnej kalibrácie.

9.9. GIS spracovanie a tvorba mapových vrstiev

Aby bola metodika uskutočniteľná bez dodatočných interpretačných rozhodnutí, odporúča sa dodržať nasledujúci pevný pracovný postup. Každý krok sa zaznamená do protokolu spracovania a vykoná sa v rovnakom poradí.

1. Určiť hranicu hodnoteného územia, verziu JPRL a technickú mriežku 10×10 m.
2. Založiť adresárovú alebo geodatabázovú štruktúru SOURCE – WORK – RESULT a uzamknúť zdrojové údaje proti prepisu.
3. Pre každý vstup vyplniť konfiguračný záznam podľa tabuľky 9.5 a skontrolovať jednotku, súradnicový systém, dátum a výskyt hodnôt NoData.
4. Rasterizovať alebo prevzorkovať vstupy na pracovnú mriežku bez zmeny ich informačnej interpretácie; uložiť pôvodnú priestorovú podporu.
5. Vypočítať fixné q05 a q95 z referenčného dátového súboru, ak ešte neexistujú; pri bežnej aktualizácii načítať už uložené hodnoty.

6. Vytvoriť normalizované faktory $N_{\uparrow}$, $N_{\downarrow}$ alebo kategorizované skóre. Každý normalizovaný raster uložiť samostatne.
7. Vypočítať F_{pal} , F_{ant} a F_{klim} a následne S_{vznik} . Vytvoriť masku buniek s chýbajúcim povinným vstupom.
8. Zvoliť presne jeden režim H_{akt} (FM alebo FWI), vypočítať H_{akt} a z neho I_{vznik} .
9. Z modelovania podľa kapitoly 7 načítať R_{pov} pre definovaný scenár a vypočítať I_{pov} .
10. Z vrstiev kapitoly 6 vypočítať K_{init} , K_{maint} a I_{kor} ; následne vypočítať $I_{sir} = \max(I_{pov}, I_{kor})$.
11. Pre každý požadovaný scenár vypočítať V_S a, ak je dostupná, R_S a L_S .
12. Vypočítať $P_{0,s}$ a voliteľne $P_{obn,s}$. Spolu s výsledkom vytvoriť raster dominantného mechanizmu, samostatnú vrstvu kvality údajov Q_{dat} a samostatnú vrstvu neistoty výsledku U_{vys} .
13. Agregovať všetky primárne výsledky na JPRL pomocou rovnakej masky platných buniek a vypočítať povinné zonálne štatistiky.
14. Vykonať validačné a citlivostné testy. Ak model nespĺňa vopred stanovené kritériá, výsledok sa označí ako pracovný a nevydá sa ako finálny produkt.
15. Archivovať vstupy, konfiguračné tabuľky, skripty alebo Model Builder, protokol spracovania, výsledky a dátum spracovania pod jedným identifikátorom behu.

Po ukončení výpočtového postupu sa výsledky agregujú na úroveň JPRL. Minimálny súbor atribútov, ktorý sa musí pri každej JPRL zachovať na účely interpretácie, kontroly a opakovania analýzy, je uvedený v tabuľke 49.

Tabuľka 49 Minimálne výstupné polia agregácie na JPRL

Pole	Význam
id_jprl	jednoznačný identifikátor JPRL
verzia_beh	identifikátor analytického behu
med_*	medián príslušného indexu
avg_*	priemer príslušného indexu
p90_*	90. percentil
max_*	maximum po kontrole extrémov
pod_vys_*	podiel plochy vo vysokej a veľmi vysokej triede
pod_valid	podiel buniek s platnými povinnými vstupmi
pod_extr	podiel extrapolovaných buniek
dom_mech	dominantný mechanizmus: vznik / povrch / koruny / zraniteľnosť
trieda	prezentačná trieda podľa fixných hraníc
kval_dat	kód kvality vstupných údajov, dátovej podpory a úplnosti
neistota	samostatná hodnota, interval alebo trieda neistoty výsledku; odkaz na zdroje neistoty

9.10. Interpretácia výsledkov a návrh preventívnych opatrení

Preventívne opatrenie sa vyberá podľa dominantného mechanizmu, nie podľa samotnej výslednej triedy. Ak je vysoké I_{vznik} spôsobené najmä F_{ant} , prioritou sú opatrenia obmedzujúce antropogénnu iniciáciu.

Ak dominuje F_{pal} , opatrenie smeruje k úprave iniciačne významného jemného paliva. Ak dominuje I_{pov} , posudzuje sa horizontálna kontinuita a vlastnosti povrchového palivového komplexu. Pri vysokom I_{kor} sa posudzuje rebríkové palivo, funkčná výška korunovej bázy, objemová hustota a horizontálna kontinuita korún.

Pri vysokom V_s bez vysokého I_{vznik} alebo I_{sir} sa výsledok interpretuje ako vysoká hodnota alebo citlivosť územia, nie ako automatická potreba zásahu do paliva. V chránených územiach môže byť vhodnejším opatrením monitoring, obmedzenie iniciačných zdrojov, pripravenosť zásahu alebo ochrana konkrétnej hodnoty.

Pred návrhom nákladného opatrenia sa kontroluje raster neistoty a „pod_valid“. Ak je vysoká priorita spojená s nízkou dátovou podporou, prvým krokom je terénne overenie. Po vykonaní opatrenia sa zmenené palivové vrstvy aktualizujú a celý analytický beh sa zopakuje s novým identifikátorom. Účinok opatrenia sa vyjadruje rozdielom medzi porovnateľnými behmi, nie ručnou úpravou výslednej triedy.

9.11. Využitie výsledkov v lesnom hospodárstve, protipožiarnej ochrane a krízovom riadení

V lesnom hospodárstve sa používajú najmä S_{vznik} , I_{pov} , I_{kor} a tematické scenáre P_{eko} , P_{poda} a P_{hosp} . Výstupy umožňujú prioritizovať terénne overenie, porovnať varianty zásahu a sledovať zmenu palivového komplexu po ťažbe, kalamite alebo preventívnom opatrení.

V protipožiarnej ochrane sa statické vrstvy používajú pri plánovaní prevencie a dynamické H_{akt} a I_{vznik} pri krátkodobom hodnotení podmienok. Modelový výstup nenahrádza miestne rozhodovanie ani aktuálne pozorovanie. Operačný produkt musí obsahovať čas platnosti a označenie zdroja meteorologických údajov.

V krízovom riadení sa požiarne vrstvy prepájajú s expozíciou obyvateľstva, komunikácií a technickej infraštruktúry. Expozícia sa vedie ako samostatná vrstva a nevkladá sa späť do náchylnosti na vznik. Tým sa zachová rozdiel medzi tým, kde môže požiar vzniknúť a šíriť sa, a tým, čo môže byť požiarom zasiahnuté.

Každý distribuovaný produkt musí obsahovať minimálne názov scenára, dátum platnosti, verziu vstupov, verziu metodiky, technické rozlíšenie, skutočnú informačnú podporu, výslednú triedu, kvalitu údajov a neistotu výsledku. Bez týchto údajov sa vrstva nepovažuje za finálny analytický produkt.

9.12. Validácia, neistota, citlivosť analýza a podmienky opakovateľnosti

Validácia sa vykonáva oddelene pre každú zložku. S_{vznik} a I_{vznik} sa overujú proti geolokalizovaným miestam vzniku požiaru a vhodne zvoleným kontrolným jednotkám alebo časovým obdobiam. I_{pov} sa overuje proti pozorovanej alebo experimentálnej rýchlosti šírenia, prípadne proti nezávisle overenému modelovému súboru. I_{kor} sa overuje proti terénne zistenej vertikálnej štruktúre a, ak sú dostupné, proti pozorovaniam prechodu do korún. V_s sa overuje proti pozorovanému poškodeniu pri známej alebo aspoň porovnateľnej expozícii a R_s proti časovým radom obnovy.

Pri priestorových údajoch sa kalibračné a validačné pozorovania nesmú náhodne miešať tak, aby susedné body z rovnakého prostredia vstupovali súčasne do kalibračného aj validačného súboru. Použije sa priestorovo blokována alebo skupinová validácia, čo znižuje riziko nadhodnotenia presnosti pri priestorovej autokorelácii (Roberts et al., 2017).

Pri kategorizovaných mapách sa zostavuje konfúzna matica s riadkami ako referenčnými triedami a stĺpcami ako mapovanými triedami. Uvádza sa celková presnosť, používateľská a produkčná presnosť a počet validačných jednotiek v každej triede. Pri spojitých vrstvách sa uvádza chyba $e_i = \text{predikcia} - \text{referencia}$, MAE, RMSE a priemerná chyba. Korelácia sa nepoužíva ako jediný ukazovateľ zhody. Zásady nezávislého hodnotenia presnosti sú v súlade s odporúčaniami Stehmana a Foodyho (2019) a Olofssona et al. (2014).

Kvalita údajov a neistota výsledku sa vedú ako dve samostatné, navzájom prepojitelné informácie. Vrstva „Q_dat“ opisuje kvalitu vstupných údajov a dátovej podpory, najmä úplnosť povinných vstupov, pôvod údajov, časovú zhodu a primeranosť priestorovej podpory. Vrstva „U_vys“ opisuje neistotu výsledku a rozlišuje najmenej neistotu vstupov, modelovú neistotu, extrapoláciu, časový nesúlad a neistotu vyplývajúcu z nedostatočnej priestorovej podpory. Kvalita údajov ani neistota sa nesmú rozpustiť do samotnej hodnoty indexu. Ak možno neistotu vyjadriť numericky, uvedie sa číselná hodnota alebo interval; inak sa použije verziovaná trieda neistoty.

Za extrapolovanú sa označí bunka, v ktorej aspoň jeden modelovaný faktor leží mimo rozsahu prediktorov zastúpených v kalibračnom súbore alebo bola výsledná hodnota prenesená do typu porastu, ktorý nebol v kalibrácii zastúpený. Extrapolovaná hodnota sa môže zobraziť, ale musí byť odlíšená a nesmie sa považovať za rovnocennú s interpolovanou predikciou.

V referenčnej konfigurácii sa nepoužívajú voľne nastavované váhy v základných procesných indexoch. Citlivosťná analýza sa preto sústreďuje na normalizačné hranice, klasifikačné prahy, alternatívny režim H_{akt} , neistotu vstupov a prípadné scenárové skóre zraniteľnosti. Pri každom testovanom parametre sa odporúča vykonať minimálne zníženie a zvýšenie o 10 % a 20 %, ak má parameter spojitý význam.

Pre každý variant sa vypočíta zmena poradia JPRL, podiel JPRL, ktoré zmenili triedu, a maximálna absolútna zmena indexu. Ak viac než 20 % JPRL zmení triedu po malej ± 10 % zmene jediného neistého parametra, výsledok sa označí ako citlivý a táto informácia sa uvedie pri interpretácii. Hranica 20 % je metodické kontrolné pravidlo tejto monografie a má sa po získaní validačných údajov overiť.

Každý analytický beh sa považuje za opakovateľný iba vtedy, ak sú archivované všetky položky uvedené v tabuľke 50. Bez kompletného protokolu sa výsledok označí ako nereprodukovateľný pracovný výstup.

Tabuľka 50 Povinný protokol analytického behu

Skupina	Povinný záznam
Identifikácia	jedinečný identifikátor behu; dátum a čas spustenia; zodpovedná osoba
Územie	hranica hodnotenia; verzia JPRL; technická mriežka; súradnicový systém
Vstupy	názov, zdroj, dátum, verzia, kontrolný súčet alebo iný stabilný identifikátor súboru
Normalizácia	q05, q95 alebo pevná tabuľka skóre pre každý faktor
Model	verzia rovníc, režim H_{akt} , palivový model/scenár správania požiaru
NoData	maska platných buniek a pravidlá vyradenia
Výpočet	skript, Model Builder alebo iný vykonateľný postup; verzia softvéru
Validácia	dátový súbor, spôsob rozdelenia, metriky a výsledok kontroly

Skupina	Povinný záznam
Citlivosť	testované parametre a výsledok stability
Výstupy	rastrové vrstvy, agregácia JPRL, metadáta, legenda, kvalita údajov a neistota výsledku
Archivácia	umiestnenie surových údajov, pracovných údajov, výsledkov a protokolu

Metodika je týmto uzatvorená ako vykonateľný reťazec: definovanie referenčného dátového súboru → kontrola a harmonizácia vstupov → fixná normalizácia → výpočet náchylnosti → výpočet aktuálneho nebezpečenstva → výpočet indexu rizika vzniku požiaru → modelovanie povrchového šírenia → hodnotenie potenciálu vertikálneho prechodu a korunového šírenia → tematická zraniteľnosť a reziliencia → integrácia → agregácia na JPRL → validácia, citlivosťná analýza a archivácia. Pri rovnakých vstupoch a rovnakom konfiguračnom súbore musí nezávislý analytik dosiahnuť rovnaké numerické výsledky s rozdielmi iba na úrovni numerickej presnosti použitého softvéru.

10. POZNATKOVÁ BÁZA O PALIVE V LESE A OTVORENÝ PRÍSTUP K VÝSLEDKOM

Výsledky terénneho zisťovania, laboratórneho hodnotenia, priestorového odvodenia, tvorby palivových modelov a hodnotenia požiarneho rizika predstavujú navzájom previazané odborné údaje s rozdielnym pôvodom, priestorovou podporou, časovou platnosťou a mierou neistoty. Ich dlhodobá využiteľnosť preto nezávisí iba od vytvorenia jednotlivých mapových alebo tabuľkových výstupov. Potrebný je systém, ktorý zachová väzbu medzi zdrojovým údajom, metodikou spracovania, výslednou hodnotou, kvalitou, verziami a podmienkami ďalšieho použitia.

Poznatková báza sa v tejto monografii navrhuje ako nadstavba geodatabázy opísanej v kapitole 4. Geodatabáza zostáva analytickým dátovým jadrom a uchováva pôvodné, pracovné, odvodené, modelované a klasifikačne priradené údaje. Poznatková báza k nim pridáva dokumentáciu, metodické postupy, dátový slovník, validačné záznamy, používateľskú interpretáciu, pravidlá sprístupňovania, verzie publikovaných produktov a väzby na vedecké a aplikačné výstupy. Jej úlohou teda nie je vytvoriť druhú paralelnú databázu, ale zabezpečiť riadené uchovávanie, vysvetlenie, publikovanie a opätovné použitie výsledkov.

Návrh vychádza z princípov FAIR, podľa ktorých majú byť digitálne výskumné objekty vyhľadateľné, dostupné za jasne definovaných podmienok, interoperabilné a opätovne použiteľné. FAIR pritom neznamena, že každý údaj musí byť verejne stiahnuteľný bez obmedzenia; prístup môže byť podmienený autentifikáciou alebo oprávnením, ak sú podmienky prístupu transparentne opísané (Wilkinson et al., 2016). Rovnakú logiku vyjadruje zásada otvorenej vedy „tak otvorené, ako je možné, tak uzavreté, ako je potrebné“, ktorá umožňuje vyvážiť sprístupňovanie výsledkov s právami k údajom a oprávnenou ochranou citlivého obsahu (European Commission, Directorate-General for Research and Innovation 2022).

Kapitola je preto formulovaná ako uskutočniteľný návrh správy a sprístupňovania poznatkovej bázy. Neopisuje hotový portál ani predpokladané technické riešenie, ktoré ešte nebolo implementované. Definuje minimálnu funkčnú štruktúru, pravidlá publikovania, metadáta, verziovanie, aktualizčný cyklus a úrovne prístupu tak, aby bolo možné výsledky vytvorené podľa metodík predchádzajúcich kapitol uchovať a publikovať reprodukovateľným spôsobom.

10.1. Význam otvoreného prístupu k údajom o lesnom palive

Otvorený prístup zvyšuje vedeckú aj praktickú hodnotu údajov iba vtedy, ak je spojený s dostatočnou dokumentáciou. Samostatný raster množstva paliva alebo výsledná mapa prioritizačného indexu bez informácie o zdrojoch, metodike, období platnosti a neistote môže byť síce technicky dostupná, ale odborne nemusí byť opätovne použiteľná. Sprístupnenie sa preto chápe ako publikovanie dátového objektu spolu s informáciami potrebnými na jeho interpretáciu, kontrolu a citovanie.

Základnou požiadavkou je oddeliť analytický zdroj od distribučného produktu. Analytická verzia obsahuje úplnú atribútovú štruktúru, presnú väzbu na zdrojové údaje, modely, validačné výsledky a neistotu. Distribučná verzia môže byť technicky optimalizovaná, generalizovaná alebo tematicky zjednodušená podľa cieľovej skupiny, ale musí obsahovať jednoznačný odkaz na analytickú verziu, z ktorej vznikla. Prezentačná mapa alebo webová vizualizácia sa nepovažuje za náhradu analytického dátového produktu.

Otvorenosť sa uplatňuje prednostne na vlastné metodické výstupy, odvodené produkty, metadáta a dokumentáciu, pri ktorých má správca právo určiť podmienky ďalšieho použitia. Pri údajoch prevzatých od tretích strán sa rešpektujú pôvodné licenčné a prístupové podmienky. Vytvorenie odvodeného produktu samo osebe nezakladá právo na voľné ďalšie šírenie všetkých zdrojových vrstiev.

Poznatková báza preto podporuje otvorenosť výsledkov, nie nekontrolované kopírovanie všetkého vstupného obsahu. Pre každý publikovaný objekt sa musí určiť, čo je možné sprístupniť, v akej informačnej podrobnosti, za akej licencie alebo podmienok a s akými obmedzeniami použitia.

10.2. Štruktúra poznatkovej bázy o palive a požiarnom riziku

Poznatková báza sa navrhuje modulárne. Funkčné moduly zodpovedajú jednotlivým stupňom spracovateľského reťazca monografie a zároveň oddeľujú údaje od ich interpretácie. Základom je analytická geodatabáza, ku ktorej sú pripojené laboratórne a terénne záznamy, modelové a hodnotiace výstupy, metodická dokumentácia, validačné informácie a publikačná vrstva.

Každý objekt musí mať stabilný interný identifikátor, ktorý sa nemení pri zmene názvu súboru alebo umiestnenia. Zverejnená, obsahovo uzavretá verzia dátového produktu má mať samostatný identifikátor verzie; ak je uložená v repozitári podporujúcom trvalé identifikátory, odporúča sa pridať jej perzistentný identifikátor, napríklad DOI. DataCite Metadata Schema 4.7 poskytuje všeobecný rámec na identifikáciu a citovanie výskumných dát a ďalších výskumných výstupov a zahŕňa aj verziu, práva, opis, geografickú polohu a väzby na súvisiace objekty (DataCite Metadata Working Group, 2026).

Základné funkčné moduly poznatkovej bázy, ich obsah a vzájomná úloha sú uvedené v tabuľke 51.

Tabuľka 51 Funkčné moduly poznatkovej bázy o lesnom palive a požiarnom riziku

Modul	Minimálny obsah	Hlavná funkcia
Analytické dátové jadro	zdrojové, terénne, laboratórne, pracovné a výsledné údaje podľa kapitoly 4	sledovateľnosť a reprodukcia analytického spracovania
Palivové charakteristiky	povrchové, rebríkové a korunové parametre; dynamická vlhkosť	odborný opis palivového komplexu
Palivové modely	kód modelu, verzia pravidiel, stav priradenia, alternatívny kandidát, dátová podpora	modelovanie správania požiaru a opätovná klasifikácia
Požiarné vlastnosti	výsledky zapáliteľnosti, vlhkosť vzťahy, TG/DTG/DSC, popol, spalné teplo a výhrevnosť	materiálová interpretácia palivových komponentov
Hodnotiace vrstvy	náchylnosť, aktuálne nebezpečenstvo, potenciál šírenia, zraniteľnosť, reziliencia, prioritizačné indexy	priestorové hodnotenie podľa kapitoly 9
Kvalita a overenie	validačné súbory, ukazovatele presnosti, dátová podpora, neistota, extrapolácia	posúdenie použiteľnosti a dôveryhodnosti
Metodiky a dokumentácia	dátový slovník, klasifikačné pravidlá, konfiguračné súbory, pracovné postupy, návody	reprodukovateľnosť a odborná interpretácia
Publikačná vrstva	distribučné dátové balíky, metadáta, licencie, citácia, záznam verzie, zmenový protokol	sprístupnenie výsledkov používateľom

10.3. Typy údajov zahrnuté v poznatkovej báze

Poznatková báza musí zachovať rozdiel medzi údajom a produktom vytvoreným jeho interpretáciou. Pôvodné terénne meranie, modelovaný raster a výsledná trieda rizika preto nemajú rovnaký status.

Pri každom objekte sa eviduje jeho pôvod, stupeň spracovania a rozsah, v ktorom ho možno použiť mimo pôvodnej analýzy.

Prvou skupinou sú pôvodné zdrojové údaje. Zahŕňajú vlastné terénne a laboratórne merania a prevzaté lesnícke, topografické, environmentálne a diaľkovo snímané podklady. Druhou skupinou sú harmonizované pracovné údaje vzniknuté reprojekciou, kontrolou, odvodením premenných alebo inou dokumentovanou transformáciou. Tretiu skupinu tvoria primárne analytické palivové parametre, pri ktorých zostáva zachovaná fyzikálna veličina a jednotka. Štvrtou sú klasifikačné a modelové produkty, napríklad palivové modely alebo triedy vertikálnej kontinuity. Piatou skupinou sú dynamické časovo označené údaje, najmä vlhkosť a aktuálne hodnotiace vrstvy. Šiestou sú výsledky validácie, neistoty a dátovej podpory. Siedmou skupinou sú metodické, dokumentačné a publikačné objekty.

V nadväznosti na kapitolu 8 sa v poznatkovej báze nevytvára databáza jednej univerzálnej „kritickej vlhkosti“ pre dreviny alebo palivové modely. Ukladajú sa experimentálne výsledky viazané na konkrétny palivový komponent a skúšobný režim, prípadne odvodené prechodové pásmo alebo kalibrovaný vzťah medzi vlhkosťou a pravdepodobnosťou zapálenia. Takáto informácia zostáva oddelená od modelovej vlhkosti vyhasnutia používaného palivového modelu.

Každý typ údajov má odlišný režim aktualizácie a sprístupnenia. Odporúčané členenie je uvedené v tabuľke 52.

Tabuľka 52 Typy údajov, spôsob správy a odporúčaný režim sprístupnenia

Typ objektu	Príklad	Aktualizácia	Predvolený režim
Pôvodné vlastné meranie	terénna plocha, laboratórna vzorka	nový záznam; pôvodný záznam sa neprepisuje	kontrolovaný alebo otvorený podľa citlivosti
Prevzatý zdrojový údaj	JPRL, lidar, družicový alebo topografický produkt	podľa vydania zdroja	podľa licencie pôvodného poskytovateľa
Analytický palivový parameter	množstvo jemného paliva, výška korunovej bázy	pri nových vstupoch alebo modeli	otvorený, ak to dovoľujú práva a citlivosť
Klasifikačný/modelový výstup	palivový model, trieda rebríkového paliva	pri zmene pravidiel alebo vstupov	otvorený s verziou pravidiel
Dynamický údaj	vlhkosť jemného paliva, aktuálny index nebezpečenstva	časový rad / operačný cyklus	otvorený alebo kontrolovaný; vždy s časom platnosti
Hodnotiaci výstup	náchylnosť, zraniteľnosť, reziliencia, prioritizačný index	nový analytický beh alebo scenár	otvorený s úplnou metodickou dokumentáciou
Validácia a neistota	chyba modelu, dátová podpora, extrapolácia	spolu s príslušnou verziou produktu	sprístupniť spolu s výsledkom
Metodika a dokumentácia	dátový slovník, konfiguračný súbor, zmenový protokol	pri každej metodickej zmene	prednostne otvorený

10.4. Geodatabáza, mapové vrstvy a tabuľkové databázy

Geodatabáza z kapitoly 4 zostáva jediným analytickým jadrom. Kapitola 10 neurčuje novú paralelnú atribútovú schému, ale pravidlá, podľa ktorých sa z analytických objektov vytvárajú publikovateľné dátové

balíky. Pri exporte sa nemení odborný význam polí ani jednotiek a distribučný súbor musí byť späť prepojitelný s konkrétnou verziou analytického zdroja.

Pre vektorové analytické alebo distribučné údaje sa uprednostňuje GeoPackage. OGC GeoPackage 1.4.0 je otvorený, platformovo nezávislý kontajner založený na SQLite, ktorý umožňuje uchovávanie vektorových prvkov, atribútov a ďalšieho geopriestorového obsahu v jednom súbore (Open Geospatial Consortium, 2024). Pre rastrové analytické produkty zostáva vhodný GeoTIFF; pri veľkých súboroch distribuovaných prostredníctvom webu sa môže použiť Cloud Optimized GeoTIFF, ktorého štandardizovaná štruktúra umožňuje prenášať iba potrebnú časť rastrového súboru pri vizualizácii alebo analýze (Open Geospatial Consortium, 2023).

CSV možno používať na otvorenú tabuľkovú výmenu, ak sa súčasne poskytuje dátový slovník, jednoznačné identifikátory a pravidlá pre chýbajúce hodnoty. XLSX je vhodný ako používateľský alebo výmenný formát, nie ako jediný dlhodobý analytický archív. PDF, PNG a prezentačný TIFF sú prezentačné výstupy a nenahrádzajú pôvodnú analytickú vrstvu.

Publikovaný balík sa nesmie skladať iba z dátového súboru. Minimálne má obsahovať samotné dáta, metadátový záznam, súbor README, dátový slovník alebo odkaz na jeho platnú verziu, licenčné alebo prístupové podmienky, opis verzie a zmien a kontrolný súčet súborov. Ak je výsledok reprodukovateľný skriptom alebo konfiguračným súborom, odporúča sa pripojiť aj tento objekt alebo trvalý odkaz naň. Odporúčaná štruktúra distribučného balíka je uvedená v tabuľke 53.

Tabuľka 53 Odporúčaná štruktúra distribučného dátového balíka

Súčasť	Odporúčaný formát / obsah	Povinnosť
Vektorové údaje	GeoPackage; prípadne ďalší interoperabilný export	povinné podľa typu produktu
Rastrové údaje	GeoTIFF; pri webovej distribúcii COG	povinné podľa typu produktu
Tabuľkové údaje	CSV; doplnkovo XLSX pre používateľské použitie	podľa obsahu produktu
Metadáta	strojovo čitateľný záznam + používateľsky čitateľný súhrn	povinné
README	účel, obsah, štruktúra, rýchly návod, kontakt na správcu	povinné
Dátový slovník	kódy, definície, jednotky, typy, NoData/NULL pravidlá	povinné pri atribútových dátach
Licencia a práva	licencia alebo presné podmienky prístupu a ďalšieho použitia	povinné
Verzia a zmeny	identifikátor verzie, dátum vydania, changelog	povinné
Kontrolný súčet	napr. SHA-256 pre publikované súbory	odporúčané
Skript / konfigurácia	pracovný skript, parametre alebo odkaz na archivovanú verziu	odporúčané pri odvodených produktoch

10.5. Metadáta, dokumentácia a používateľská interpretácia výstupov

Metadáta sa vytvárajú súčasne s dátovým objektom a aktualizujú sa pri každej novej publikovanej verzii. Nemajú sa dopĺňať až späť po ukončení spracovania, pretože tým rastie riziko straty informácie o zdrojoch, transformačných krokoch a verziách modelu. ISO 19115-1:2014 poskytuje rámec na opis identifikácie, rozsahu, kvality, priestorových a časových vlastností, obsahu, referenčného systému a distribúcie geografických údajov. Informácie o kvalite, spôsobe jej hodnotenia a výsledkoch overenia sa

dokumentujú podľa princípov ISO 19157-1:2023 (International Organization for Standardization, 2014; 2023).

Metadátový záznam musí umožniť používateľovi odpovedať najmenej na otázky: čo objekt obsahuje, kto ho vytvoril, z akých zdrojov vznikol, k akému územiu a obdobiu sa vzťahuje, v akej informačnej podrobnosti ho možno interpretovať, akou metodikou bol odvodený, ako bol overený, aká neistota je s ním spojená, aké sú podmienky prístupu a ako sa má citovať. Pri modelovaných a klasifikačných produktoch sa osobitne uvádza verzia modelu alebo pravidla.

Pri verejne publikovaných vedeckých dátových produktoch možno nad rámec geografických metadát vytvoriť aj citačný záznam kompatibilný s DataCite. Tento záznam nenahrádza odborne podrobné geografické metadáta, ale dopĺňa ich o prvky potrebné na identifikáciu, vyhľadávanie, citovanie, verziovanie a vyjadrenie práv k výskumnému objektu (DataCite Metadata Working Group, 2026).

Minimálny rozsah metadát publikovaného objektu je uvedený v tabuľke 54.

Tabuľka 54 Minimálny rozsah metadát publikovaného objektu poznatkovej bázy

Oblasť	Minimálny obsah
Identifikácia	názov; interný identifikátor; verzia; typ objektu; tvorca/správca; kontakt
Odborný význam	definícia parametra alebo produktu; účel; jednotka; dátový typ; číselník alebo prípustný rozsah
Priestor	súradnicový referenčný systém; územný rozsah; geometria alebo veľkosť bunky; skutočná informačná podpora
Čas	referenčné obdobie; valid_from/valid_to pri dynamickom produkte; dátum vytvorenia; dátum vydania
Pôvod	zdrojové údaje; pôvod hodnoty; identifikátor analytického behu; metóda odvodenia; verzia metodiky/modelu
Kvalita	spôsob overenia; validačný súbor; ukazovatele presnosti; dátová podpora; rozsah extrapolácie; neistota
Distribúcia	formát; veľkosť; spôsob prístupu; názov publikovaného balíka; kontrolný súčet
Práva a citácia	licencia alebo podmienky použitia; obmedzenia; odporúčaný citačný záznam; perzistentný identifikátor, ak bol pridelený
Vzťahy	väzba na predchádzajúcu/nasledujúcu verziu; metodiku; publikáciu; súvisiace vrstvy a tabuľky

Používateľská dokumentácia musí byť oddelená od metadát, ale obsahovo s nimi nesmie byť v rozpore. Vysvetľuje význam vrstvy v bežnom odbornom jazyku, vhodné a nevhodné použitie, interpretáciu tried a spojitých hodnôt, význam neistoty a príklady rozhodovacích situácií. Pri výstupoch kapitoly 9 musí používateľ jednoznačne rozlíšiť náchylnosť na vznik požiaru, aktuálne nebezpečenstvo vzniku, potenciál povrchového šírenia, štruktúrny potenciál vertikálneho prechodu a korunového šírenia, zraniteľnosť, rezilienciu a prioritizačný index.

Používateľská vrstva nikdy nesmie zjednodušiť výsledok tak, že sa stratí jeho metodický význam. Farebné triedy vo výstupných mapách preto musia byť prepojitelné s číselnou hodnotou, definíciou triedy, referenčným obdobím a verziou analytického produktu.

10.6. Cieľové skupiny používateľov poznatkovej bázy

Poznatková báza sa navrhuje pre viacero skupín používateľov, ale analytický zdroj zostáva spoločný. Nevytvárajú sa samostatné, navzájom nekompatibilné verzie „pravdy“ pre výskum, lesníctvo a protipožiarnu ochranu. Rozdielna je forma prezentácie, úroveň podrobnosti a prístupové oprávnenie.

Výskumné pracoviská potrebujú úplné analytické vrstvy, laboratórne a terénne záznamy v povolenom rozsahu, metodiky, validačné výsledky, metadáta a informácie potrebné na opakovanie analýz. Vysoké školy a vzdelávacie pracoviská potrebujú dokumentované dátové súbory, výučbové scenáre a metodické vysvetlenie. Lesnícke subjekty využijú najmä výstupy agregované na JPRL, informácie o palivovej heterogenite a vrstvy využiteľné pri plánovaní manažmentu paliva. Subjekty protipožiarnej ochrany a krízového riadenia potrebujú prepojenie palivových a rizikových charakteristík s priestorovou dostupnosťou, chránenými hodnotami a aktuálnou situáciou.

Verejný používateľ môže pracovať s prehľadovými mapami, metodickými vysvetleniami a generalizovanými produktmi. Verejná vizualizácia však nesmie vytvárať dojem presnosti, ktorú zdrojové údaje neposkytujú. Pri každom produkte sa preto uvádza odporúčaná mierka alebo úroveň použitia a stručné vysvetlenie neistoty.

10.7. Využitie poznatkovej bázy vo výskume a vzdelávaní

Vo výskume má poznatková báza význam najmä ako reprodukovateľný zdroj vstupov a výstupov. Umožňuje opätovne zostaviť palivové vrstvy, porovnávať rôzne verzie palivových modelov, testovať nové priestorové algoritmy, overovať vzťahy medzi palivom a správaním požiaru a analyzovať citlivosť výsledkov na vstupné údaje alebo metodické nastavenie. Podmienkou takéhoto využitia je zachovanie pôvodných meraní, verzií odvodených produktov a identifikátora analytického behu.

Pri porovnávaní území alebo období sa musí používať rovnaká definícia parametra a kompatibilná metodika. Rozdiel medzi dvoma mapami môže byť spôsobený skutočnou zmenou paliva, novými vstupmi, zmenou modelu alebo zmenou klasifikačných hraníc. Poznatková báza musí tieto príčiny umožniť rozlíšiť.

Vo vzdelávaní možno pripraviť výučbové balíky odvodené z analytických dát. Takýto balík má mať vlastný identifikátor a musí byť označený ako zjednodušený, anonymizovaný alebo generalizovaný produkt. Zachováva metodickú logiku, ale nemusí obsahovať citlivé súradnice, úplné prevádzkové informácie ani všetky atribúty analytickej vrstvy.

Výučbový materiál môže pozostávať z palivového profilu, vybraných rastrových a vektorových vrstiev, dátového slovníka, pracovného zadania a referenčného výsledku. Študent tak môže opakovať rovnaký postup od kontroly vstupov cez priestorovú analýzu až po interpretáciu neistoty, pričom sa učí rozlišovať meraný, odvodený, modelovaný a klasifikačne priradený údaj.

10.8. Využitie poznatkovej bázy v lesníckej praxi a v praxi ochrany pred požiarmi

V lesníckej praxi sa poznatková báza využíva ako podporný informačný systém pre identifikáciu JPRL s palivovými charakteristikami, ktoré si vyžadujú terénne overenie alebo posúdenie manažmentového zásahu. Vhodné sú najmä vrstvy množstva a horizontálnej kontinuity jemného povrchového paliva, rebríkového paliva, výšky korunovej bázy, objemovej hustoty korunového paliva, palivových modelov

a výsledkov hodnotenia podľa kapitoly 9. Pri agregácii sa zachováva vnútorná heterogenita JPRL, nie iba dominantná trieda.

Poznatková báza umožňuje porovnať stav pred zásahom a po zásahu, ak sú oba dátové produkty vytvorené kompatibilnou metodikou. Tým možno sledovať napríklad zmenu palivovej kontinuity alebo štruktúrneho potenciálu vertikálneho prechodu. Samotný rozdiel medzi mapami sa však nesmie interpretovať ako účinok zásahu, ak sa súčasne zmenili vstupné údaje alebo metodika; túto informáciu musí poskytovať zmenový protokol.

V praxi protipožiarnej ochrany slúžia mapové vrstvy ako podklad pre prevenciu, plánovanie, odbornú prípravu a hodnotenie územia pred požiarom. Aktuálne dynamické vrstvy sa môžu pripojiť k statickým palivovým charakteristikám, ale poznatková báza nenahrádza terénny prieskum ani odborné rozhodovanie pri konkrétnej udalosti. Pri operačnom použití sa musí kontrolovať dátum a čas platnosti dynamických vrstiev a dostupnosť najnovšej verzie.

Pre praktické použitie má každý výsledný produkt obsahovať krátku interpretačnú kartu. Tá uvádza účel, vhodnú mierku, čas platnosti, dominantné zdroje neistoty, význam tried a odporúčané nadväzujúce kroky. Odporúčanie sa viaže na dominantný problém, nie iba na výslednú farbu komplexného indexu.

10.9. Princípy aktualizácie a dlhodobej udržateľnosti poznatkovej bázy

Poznatková báza sa spravuje ako verziovaný a aktualizovateľný systém. Aktualizácia nikdy neprepisuje archivovanú publikovanú verziu produktu. Nové údaje alebo nová metodika vytvárajú novú verziu, pričom predchádzajúca verzia zostáva dostupná na spätnú kontrolu a citovanie. Tento princíp nadväzuje na verziovanie geodatabázy v kapitole 4.

Rozlišujú sa tri základné spúšťače aktualizácie. Plánovaná aktualizácia sa vykonáva po vydaní nových pravidelne obnovovaných podkladov. Aktualizácia udalostí sa aktivuje po požari, vetrovej alebo podkôrnikovej disturbancii, rozsiahlej ťažbe alebo inom zásahu, ktorý môže významne zmeniť palivový komplex. Metodická aktualizácia sa vykoná pri zmene klasifikačného pravidla, modelu, normalizačného postupu alebo validačného rámca. Dynamické vrstvy majú samostatný časový cyklus a archivujú sa ako časovo označené snímky alebo časové rady.

Každá aktualizácia prechádza rovnakou kontrolnou postupnosťou: registrácia dôvodu zmeny, získanie a archivácia vstupov, kontrola licencie a kvality, vytvorenie novej pracovnej verzie, analytické spracovanie, validácia, kontrola metadát, odborné schválenie, vytvorenie distribučného balíka, publikovanie a archivácia. Tento postup je uvedený v tabuľke 55.

Stav produktu sa odporúča viesť najmenej ako pracovný, overovaný, publikovaný, nahradený a stiahnutý z používania. Nahradená verzia sa nemaže; jej stav a odkaz na novšiu verziu zostávajú viditeľné. Ak sa zistí závažná chyba, produkt sa označí ako stiahnutý z používania a používateľ dostane informáciu o dôvode a náhradnej verzii, ak existuje.

Tabuľka 55 Minimálny pracovný postup aktualizácie a publikovania novej verzie

Krok	Činnosť	Povinný záznam
1	registrácia dôvodu aktualizácie	typ zmeny; dátum; zodpovedná osoba
2	archivácia nových vstupov	identifikátor vstupu; zdroj; licencia; dátum

Krok	Činnosť	Povinný záznam
3	kontrola kvality a časovej platnosti	výsledok kontroly; chýbajúce údaje; obmedzenia
4	vytvorenie pracovnej verzie	verzia pracovného postupu; konfigurácia; softvérové prostredie
5	analytické spracovanie	identifikátor analytického behu; použité modely/pravidlá
6	overenie výsledku	validačný súbor; ukazovatele; neistota; rozsah extrapolácie
7	kontrola metadát a práv	úplnosť metadát; licencia/prístupová trieda
8	odborné schválenie	schvaľujúca osoba/pracovisko; dátum
9	vytvorenie distribučného balíka	zoznam súborov; kontrolné súčty; README; changelog
10	publikovanie a archivácia	identifikátor vydania; perzistentný identifikátor, ak existuje; väzba na predchádzajúcu verziu

Dlhodobá udržateľnosť vyžaduje určeného správcu poznatkovej bázy a jasné rozdelenie zodpovedností. Správca zabezpečuje technickú prevádzku, zálohovanie, správu identifikátorov, kontrolu metadát, verziovanie a prístupové oprávnenia. Odborný gestor zodpovedá za metodickú správnosť, schválenie aktualizácií, dátový slovník a interpretáciu. Pri menšom pracovisku môžu byť obe funkcie organizačne spojené, zodpovednosti však musia zostať explicitne uvedené.

Technická udržateľnosť sa podporuje používaním otvorených alebo dlhodobo široko podporovaných formátov, archiváciou dokumentácie a kontrolných súčtov a pravidelnou kontrolou čitateľnosti starších vydaní. Publikovaný výstup sa nemá viazať iba na jednu webovú aplikáciu; dáta a metadáta musia byť uchované samostatne od prezentačného rozhrania.

10.10. Obmedzenia otvoreného sprístupnenia a ochrana citlivých údajov

Otvorený prístup sa uplatňuje na úrovni konkrétneho dátového objektu. Pred publikovaním sa posudzuje právny režim zdrojových údajov, licenčné obmedzenia, citlivosť priestorovej informácie a možné bezpečnostné alebo ochrannárske dôsledky zverejnenia. FAIR prístup je zlučiteľný aj s autentifikovaným alebo autorizovaným prístupom, ak sú podmienky prístupu opísané a metadáta umožňujú objekt vyhľadať (Wilkinson et al., 2016).

Pre poznatkovú bázu sa navrhujú tri prístupové triedy: otvorená, kontrolovaná a obmedzená. Otvorená trieda je určená pre objekty, ktoré možno verejne sprístupniť v plnej publikačnej podobe. Kontrolovaná trieda vyžaduje registráciu, dohodu o použití alebo schválenie správcom. Obmedzená trieda je určená pre objekty, ktoré sa verejne nezverejňujú alebo sa poskytujú len osobitne oprávneným používateľom. Metadátový záznam môže zostať verejný aj vtedy, keď samotné dáta nie sú verejne prístupné, pokiaľ tým nedôjde k prezradeniu citlivej informácie.

Za citlivé sa môžu podľa konkrétneho prípadu považovať presné súradnice terénnych plôch, lokalizácie citlivých biotopov alebo druhov, vybrané údaje o technickej a bezpečnostne významnej infraštruktúre a neverejné prevádzkové údaje. Rovnako sa nesprístupňujú prevzaté zdrojové dáta v rozpore s ich licenciou. Namiesto úplného zablokovania produktu možno podľa rizika použiť generalizáciu, agregáciu, odstránenie vybraných atribútov alebo oddelenie verejného a kontrolovaného balíka.

Prístupová trieda sa neurčuje iba podľa typu vrstvy, ale podľa konkrétneho obsahu a podmienok použitia. Rovnaký tematický produkt môže mať verejnú generalizovanú verziu a odbornú detailnú verziu. Obe musia mať odlišný identifikátor, vlastné metadáta a jednoznačne uvedené obmedzenia. Odvodená verejná verzia nesmie nahradiť detailný analytický zdroj.

Odporúčaný rozhodovací rámec prístupových tried je uvedený v tabuľke 56.

Tabuľka 56 Prístupové triedy a pravidlá sprístupnenia údajov

Trieda	Charakteristika	Typické opatrenie	Príklad použitia
Otvorená	práva a citlivosť umožňujú verejné sprístupnenie	voľné stiahnutie alebo verejná služba; jasná licencia a citácia	metodiky, dátový slovník, odvodené mapy s primeranou podrobnosťou
Kontrolovaná	detail je odborne užitočný, ale vyžaduje kontrolu používateľa alebo účelu	registrácia; dohoda o použití; autentifikovaný prístup	detailnejšie referenčné alebo odborné vrstvy
Obmedzená	zverejnenie je nevhodné z dôvodu práv, citlivosti alebo bezpečnosti	prístup len povereným osobám; verejne nanajvýš bezpečné metadáta alebo agregácia	vybrané presné lokality, neverejné prevádzkové alebo licenčne obmedzené údaje

Rozhodnutie o prístupovej triede sa zaznamenáva do metadát spolu s dôvodom a dátumom posúdenia. Pri zmene právnych, licenčných alebo odborných podmienok možno prístupovú triedu prehodnotiť; samotná zmena oprávnenia však nemení analytický obsah archivovanej verzie.

Takto navrhnutá poznatková báza uzatvára metodický reťazec predchádzajúcich kapitol. Umožňuje zachovať výsledok spolu s jeho pôvodom, metodikou, validačnou informáciou a neistotou, sprístupniť vhodnú verziu konkrétnej cieľovej skupine a zároveň oddeliť otvorenosť od nekontrolovaného zverejňovania. Hlavným výstupom kapitoly nie je konkrétna webová aplikácia, ale súbor pravidiel, podľa ktorých možno údaje o lesnom palive a požiarom riziku dlhodobo spravovať, aktualizovať, publikovať a opätovne použiť bez straty ich odborného významu.

11. APLIKAČNÝ VÝZNAM VÝSLEDKOV PRE PROTIPOŽIARNU OCHRANU, LESNÉ HOSPODÁRSTVO A KRÍZOVÉ RIADENIE

Predchádzajúce kapitoly vytvorili súvislý metodický systém od zisťovania a mapovania lesného paliva cez geodatabázové spracovanie, tvorbu palivových modelov a laboratórne hodnotenie požiarnych vlastností až po priestorové hodnotenie náchylnosti na vznik požiaru, aktuálneho nebezpečenstva, potenciálu povrchového a korunového šírenia, zraniteľnosti, reziliencie a výslednej priority. Aplikčný význam týchto výsledkov nespočíva v samotnom vytvorení mapy. Rozhodujúce je, či je možné z výsledku jednoznačne odvodiť, aký problém bol identifikovaný, aké opatrenie je primerané, aké údaje treba pred rozhodnutím overiť a kedy je potrebné analýzu zopakovať.

V praktickom použití sa rozlišujú štyri úrovne rozhodovania. Preventívna úroveň je zameraná na obmedzenie vzniku požiaru. Palivovo-manažérska úroveň je zameraná na zmenu množstva alebo priestorovej kontinuity paliva a tým na možné správanie už vzniknutého požiaru. Úroveň pred požiarom a zásahová úroveň využíva výsledky na prípravu scenárov, orientáciu v území a podporu operačného rozhodovania. Strategická úroveň prepája výsledky s lesným hospodárstvom, plánovaním ochrany pred požiarom, krízovým riadením, civilnou ochranou a klimatickou adaptáciou.

Pri každej aplikácii je nevyhnutné používať iba výstup s platnou verziou, známym časom platnosti, primeranou informačnou podporou a uvedenou neistotou. Národná alebo regionálna mapa nenahrádza miestny terénny prieskum. Naopak, jej hlavnou úlohou je identifikovať územia, v ktorých je potrebné podrobnejšie overenie, preventívny zásah alebo prednostná príprava. Rovnaký princíp sa uplatňuje pri využití poznatkovej bázy z kapitoly 10.

11.1. Využitie mapovania paliva pri prevencii lesných požiarov

Prevencia vzniku lesného požiaru vyžaduje súčasné posúdenie iniciačne významného paliva a priestorovej prítomnosti pravdepodobných iniciačných zdrojov. Mapovanie povrchového paliva poskytuje informáciu o type a množstve jemného odumretého paliva, jeho horizontálnej kontinuite a ďalších vlastnostiach, ktoré rozhodujú o tom, či môže počiatočné horenie pokračovať. Táto informácia sa pri preventívnom rozhodovaní prepája s náchylnosťou na vznik požiaru podľa kapitoly 9.

Pre prevenciu sa prednostne používajú vrstva náchylnosti na vznik požiaru „S_vznik“, aktuálny index rizika vzniku požiaru „I_vznik“, aktuálne nebezpečenstvo „H_akt“ a základné palivové vrstvy, z ktorých boli tieto indexy odvodené. Samotný palivový model sa na určenie pravdepodobnosti iniciácie nepoužíva, pretože jeho primárnou úlohou je modelovanie správania povrchového požiaru po jeho vzniku.

Osobitnú pozornosť si vyžadujú okraje lesných porastov a kontaktné územia lesa a zástavby, úseky pri komunikáciách a železničiach, rekreačne využívané lokality, miesta pravidelného pohybu osôb a plochy nadväzujúce na poľnohospodársku alebo trávnatú vegetáciu. Ich zaradenie medzi priority však nesmie byť založené iba na vzdialenosti od objektu. Rozhodujúca je kombinácia iniciačného kontextu s reálnou prítomnosťou jemného paliva a jeho aktuálnou dostupnosťou pre horenie.

Praktický postup je dvojstupňový. Statická vrstva „S_vznik“ určuje lokality vhodné na dlhodobšie preventívne opatrenia, napríklad na úpravu okolia rizikových miest, kontrolu stavu paliva alebo zacielenie preventívnych prehliadok. Dynamické vrstvy „H_akt“ a „I_vznik“ určujú obdobia, v ktorých je potrebné

zvýšiť pozornosť, kontrolnú činnosť alebo informačné opatrenia. Dynamická vrstva sama osebe nemi statickú palivovú mapu.

Rozhodovacie využitie jednotlivých vrstiev v preventívnej, palivovo-manažérskej, zásahovej a strategickej oblasti je zhrnuté v tabuľke 57.

Tabuľka 57 Rozhodovacie využitie hlavných analytických vrstiev

Vrstva / výstup	Hlavný význam	Primárne použitie	Nevhodná interpretácia
S_vznik	dlhodobejšia náchylnosť na vznik požiaru	preventívne plánovanie a výber lokalít na kontrolu	aktuálne denné nebezpečenstvo
H_akt	aktuálny stav podporujúci zapálenie a udržanie horenia	krátkodobá pohotovosť a operačná informácia	trvalá vlastnosť územia
I_vznik	kombinácia náchylnosti a aktuálneho stavu	krátkodobá prioritizácia vzniku požiaru	pravdepodobnosť požiaru bez kalibrácie
I_pov	potenciál povrchového šírenia požiaru	palivový manažment, scenáre správania	náchylnosť na iniciáciu
I_kor	štruktúrny potenciál vertikálneho prechodu a korunového šírenia	redukcia rebríkového paliva a úprava korunovej štruktúry	predpoveď konkrétneho korunového požiaru
V_s	zraniteľnosť pre zvolený scenár	ochrana hodnôt a zníženie dôsledkov	požiarne nebezpečenstvo
R_s / L_s	reziliencia / nízka reziliencia	plánovanie obnovy a adaptácie	okamžitá zásahová situácia
P_s	prioritizačný index pre scenár	poradie lokalít na preverenie alebo zásah	samostatný dôvod na konkrétne opatrenie

11.2. Podpora rozhodovania v protipožiarnej ochrane

Rozhodovanie v protipožiarnej ochrane musí vychádzať z príčiny vysokej hodnoty, nie iba z výslednej triedy. V kapitole 9 sa preto pri každom výsledku zachováva dominantný mechanizmus v poli „dom_mech“. Rovnaká vysoká priorita môže vzniknúť v dôsledku antropogénnej iniciačnej predispozície, vysokého potenciálu povrchového šírenia, vertikálneho prechodu do korún alebo vysokej zraniteľnosti. Každá z týchto situácií vyžaduje iný typ opatrenia.

Ak je dominantným problémom vznik požiaru, preventívne opatrenie smeruje k obmedzeniu kontaktu iniciačného zdroja s jemným palivom, k zvýšeniu kontrolnej a informačnej činnosti alebo k úprave paliva v bezprostrednom okolí opakovane využívaných miest. Ak dominuje I_{pov} , opatrenie sa viaže na povrchové palivo a jeho kontinuitu. Ak dominuje I_{kor} , rozhodovanie smeruje k rebríkovému palivu, funkčnej výške korunovej bázy a podľa potreby k horizontálnej kontinuite korunovej vrstvy.

Princípy úpravy palivového komplexu sa nemajú prenášať mechanicky medzi všetkými typmi lesa. Agee a Skinner (2005) ukázali, že účinok opatrení závisí od kombinácie redukcie povrchového paliva, zvýšenia výšky živých korún a zmeny korunovej hustoty. V podmienkach Slovenska sa tieto princípy používajú ako všeobecné funkčné východisko; konkrétny zásah musí rešpektovať stanovište, hospodársky cieľ, drevinové zloženie, ochranu prírody a miestnu palivovú situáciu.

V kontaktných územiach lesa a zástavby sa rozhodovanie rozširuje o ochranu objektov a osôb. Calkin, et al. (2014) upozornili, že riziko strát v takýchto územiach nemožno riešiť iba kontrolou samotného požiaru; význam majú aj podmienky, za ktorých môže dôjsť k zapáleniu chráneného objektu. V slovenskom použití to znamená, že lesná palivová mapa musí byť pri ochrane zástavby kombinovaná s vrstvou expozície objektov, dostupnosti a miestnych podmienok okolia.

Väzba dominantného mechanizmu na odporúčaný typ opatrenia a na povinné miestne overenie je uvedená v tabuľke 58.

Tabuľka 58 Väzba dominantného mechanizmu na typ opatrenia

Dominantný mechanizmus	Primárny cieľ	Príklady vhodných opatrení	Čo treba overiť v teréne
vznik – palivová zložka	obmedziť úspešnú iniciáciu	lokálna redukcia jemného suchého paliva; údržba okrajov; odstránenie lokálnych akumulácií	skutočný nositeľ iniciácie, vlhkosť, rozsah palivovej vrstvy
vznik – antropogénna zložka	obmedziť iniciačné zdroje	kontroly; informačné opatrenia; organizačné obmedzenia činností podľa aktuálnej situácie	reálne využívanie lokality a konkrétne zdroje iniciácie
I_pov	obmedziť rýchle povrchové šírenie	prerušenie alebo zníženie kontinuity; spracovanie jemných zvyškov; mozaiková úprava paliva	nositeľ šírenia, množstvo jemného paliva, účinnosť existujúcich prerušení
I_kor – iniciácia korún	znižovať vertikálny prenos	redukcia rebríkového paliva; úprava spodných vrstiev; zvýšenie funkčnej korunovej bázy	skutočné vertikálne medzery a viacvrstvomá štruktúra
I_kor – udržanie v korunách	obmedziť horizontálne korunové šírenie	úprava hustoty alebo priestorového usporiadania podľa hospodárskych a ekologických možností	korunová kontinuita a lokálna objemová hustota
V_s	znižovať potenciálne dôsledky	ochrana objektov, biotopov, pôdy, vodných zdrojov alebo infraštruktúry podľa scenára	skutočná expozícia a citlivosť hodnoteného prvku
L_s	zvýšiť schopnosť obnovy	podpora prirodzenej alebo cielej obnovy; stabilizácia pôdy; adaptačné opatrenia	stanovištné limity a reálna regeneračná schopnosť

11.3. Využitie palivových modelov pri plánovaní preventívnych opatrení

Palivový model sa pri plánovaní opatrení používa ako zjednodušený opis palivového lôžka určený na modelovanie správania povrchového požiaru. Nie je botanickou klasifikáciou porastu a nesmie byť vybraný iba podľa hlavnej dreviny alebo HSLT/SLT. V nadväznosti na kapitolu 7 sa pri každom modelovom priradení kontroluje dominantný nositeľ šírenia a zodpovedajúce palivové parametre.

Pred návrhom opatrenia sa odporúča vykonať porovnávací modelový beh pre stav pred opatrením a pre realisticky upravený palivový profil po opatrení. Menia sa iba tie parametre, ktoré má navrhovaný zásah skutočne ovplyvniť. Ak sa napríklad odstráni rebríkové palivo, nemožno súčasne svojvoľne znížiť množstvo povrchového paliva, ak technologický postup naopak vytvára nové jemné zvyšky.

Takto vytvorený scenár umožňuje porovnať zmenu modelovanej rýchlosti povrchového šírenia, prípadne intenzity čela a dĺžky plameňa, pričom tieto veličiny zostávajú modelovými výstupmi pre definované podmienky vlhkosti, vetra a sklonu. Rozdiel medzi scenármi sa interpretuje ako odhadovaný účinok zmeny palivového komplexu, nie ako garantované správanie budúceho požiaru.

Pri opatreniach v povrchovej vrstve je dôležité sledovať nielen celkové množstvo paliva, ale najmä množstvo iniciačne a šírením významných jemných zložiek, ich horizontálnu kontinuitu a hĺbku palivového lôžka. Pri opatreniach vo vertikálnom profile sa posudzuje rebríkové palivo, maximálna zvislá medzera, výška korunovej bázy a väzba na korunovú kontinuitu. Takýto postup zabraňuje tomu, aby sa úspešnosť opatrenia hodnotila iba podľa objemu odstránenej biomasy.

Po realizácii zásahu sa stav paliva znovu zaznamená alebo spoľahlivo odvodí a vytvorí sa nová verzia palivovej vrstvy. Účinok opatrenia sa vyhodnocuje porovnaním dvoch metodicky kompatibilných analytických behov, čo nadväzuje na pravidlá verziovania v kapitolách 9 a 10.

11.4. Podklady pre zásahovú činnosť a operačné rozhodovanie

Pri zásahovej činnosti majú výsledky monografie podpornú, nie riadiacu funkciu. Ich najväčší význam je pred vznikom udalosti a v počiatočnej fáze, keď poskytujú súhrnnú priestorovú informáciu o palive, teréne, očakávanom potenciáli šírenia a hodnotách v okolí. Nenahrádzajú prieskum miesta udalosti, aktuálne meteorologické údaje ani rozhodnutia veliteľa zásahu.

Operačný používateľ potrebuje podstatne menší počet vrstiev než analytik. Zložené zdrojové údaje sa preto pripravujú do informačného balíka obsahujúceho informácie o území pred požiarom. Pri dynamických vrstvách musí byť viditeľný čas platnosti. Starší výstup „H_akt“ alebo „I_vznik“ sa nesmie prezentovať ako aktuálny len preto, že je technicky dostupný v informačnom systéme.

Pre orientáciu v správaní požiaru sú významné „I_pov“, „I_kor“ a „I_sir“ spolu s modelovaným smerom a rýchlosťou šírenia pre konkrétny scenár. Pre taktické plánovanie sa dopĺňajú sklon, prístupové komunikácie, lesná dopravná sieť, vodné zdroje, nepriechodné alebo nebezpečné úseky, sídla, objekty a zraniteľné hodnoty. Tieto logistické a expozičné vrstvy nevstupujú späť do palivových parametrov.

Aktuálna vlhkosť paliva sa používa vo forme, ktorá bola overená v kapitole 8 a metodicky rozpracovaná v kapitole 9. Nepoužíva sa jedna univerzálna kritická vlhkosť pre všetky typy paliva. Pri operačnej interpretácii sa uvádza typ palivového komponentu, čas merania alebo modelovania a zdroj údajov.

Minimálny odporúčaný obsah informačného balíka obsahujúceho informácie o území pred vznikom požiaru je uvedený v tabuľke 59.

Tabuľka 59 Minimálny informačný balík o území pre zásahové plánovanie

Skupina	Povinný obsah	Časová platnosť / kontrola	Úloha
Palivo	palivový model; I_pov; I_kor; dominantný nositeľ šírenia	kontrola po zásahu, kalamite alebo novej mapovej verzii	predbežné posúdenie možného správania požiaru
Dynamický stav	H_akt alebo I_vznik; zdroj meteorologických údajov; čas platnosti	aktuálny alebo predpovedný časový horizont	informácia o aktuálnych podmienkach

Skupina	Povinný obsah	Časová platnosť / kontrola	Úloha
Terén	sklon; hlavné terénne bariéry a koridory	podľa použitého modelu reliéfu	orientácia a plánovanie postupu
Dostupnosť	komunikácie; lesná dopravná sieť; obmedzenia prejazdnosti	miestne overenie a aktualizácia	prístup a logistika
Voda	potenciálne vodné zdroje a odberné miesta	miestne overenie použiteľnosti	plánovanie zásobovania vodou
Expozícia	sídla; rekreačné objekty; infraštruktúra; chránené hodnoty	podľa aktuálnej evidencie	priorita ochrany
Kvalita	kval_dat; neistota; verzia_beh; dátum spracovania	povinné pri každom distribuovanom produkte	posúdenie použiteľnosti podkladu

11.5. Význam údajov o palive pre lesné hospodárstvo

V lesnom hospodárstve poskytujú údaje o palive informačnú vrstvu, ktorá dopĺňa tradičné porastové a stanovištné údaje o vlastnosti priamo súvisiace s požiarom správaním. Hlavná drevina, vek alebo zakmenenie nemajú byť nahradené palivovým modelom, ale ani palivový model nemá byť odvodený iba z týchto lesníckych charakteristík. Aplikčný prínos vzniká ich prepojením.

Na úrovni JPRL možno využívať základné palivové vrstvy pri plánovaní ťažby, spracovaní zvyškov, prebierkach, úprave podrastu, obnove porastu a hodnotení následkov disturbancií. Pri každom opatrení sa sleduje, ktorú palivovú vrstvu mení: povrchovú, rebríkovú alebo korunovú. Zmena jednej vrstvy môže nepriamo zhoršiť inú. Prebierka napríklad môže znížiť korunovú kontinuitu, ale ak zostanú jemné zvyšky na povrchu, dočasne zvýšiť potenciál povrchového šírenia.

Údaje o palive sú osobitne dôležité po vetrovej, podkôrníkovej alebo inej disturbancii, keď sa časť biomasy presúva medzi palivovými vrstvami a pôvodný palivový model môže prestať byť platný. Disturbancia preto neznamena automatické pridelenie novej hodnoty. Je spúšťačom kontroly a podľa potreby nového terénneho zisťovania alebo priestorového odvodnenia.

Pri rozhodovaní v kontaktných územiach lesa a zástavby musí lesné hospodárstvo zohľadňovať súčasne produkčné, ekologické a ochranné funkcie. Úprava paliva nesmie byť chápaná ako plošné odstraňovanie organickej hmoty. Odumreté drevo, opad a štruktúrna heterogenita majú ekologický význam; opatrenie sa preto sústreďuje na konkrétny mechanizmus rizika a priestor, v ktorom je zníženie palivovej kontinuity alebo vertikálneho prepojenia odôvodnené.

Odporúčaný spôsob využitia údajov o palive v jednotlivých etapách lesníckeho rozhodovania je uvedený v tabuľke 60.

Tabuľka 60 Využitie palivových údajov v lesnom hospodárstve

Rozhodovacia situácia	Kľúčové vrstvy	Otázka, ktorú má analýza zodpovedať	Nadväzujúci krok
plánovaný hospodársky zásah	množstvo povrchového paliva; I_pov; I_kor	ktoré palivové vrstvy zásah zmení a akým smerom?	modelový scenár pred/po zásahu
spracovanie zvyškov	množstvo jemného a ležiaceho drevného paliva; kontinuita	zostáva po zásahu súvislá jemná palivová vrstva?	terénna kontrola a aktualizácia vrstvy

Rozhodovacia situácia	Kľúčové vrstvy	Otázka, ktorú má analýza zodpovedať	Nadväzujúci krok
prebierka / úprava hustoty	I_kor; výška korunovej bázy; spojit_kor	zmení sa vertikálna alebo horizontálna korunová kontinuita?	kontrola povrchových zvyškov
disturbancia / poškodenie	všetky primárne palivové vrstvy; podpora_dat	je pôvodná klasifikácia ešte platná?	nové zisťovanie alebo odvodenie
obnova porastu	rebríkové palivo; R_s/L_s; stanovište	nevzniká pri obnove dlhodobá vysoká vertikálna kontinuita?	úprava výchovy a monitorovanie
kontaktné územie lesa a zástavby	S_vznik; I_pov; I_kor; V_infra	ktorý mechanizmus ohrozuje chránené hodnoty?	cieľový spoločný plán lesníckych a protipožiarnych opatrení

11.6. Identifikácia rizikových lokalít a prioritizácia opatrení

Identifikácia rizikových lokalít sa v tejto kapitole chápe ako výber území s prioritou pre ďalšie overenie alebo opatrenie, nie ako označenie všetkých buniek s vyššou hodnotou jedného indexu. Rozhodovanie vychádza z analytického profilu lokality, t. j. vrstiev: „I_vznik“, „I_pov“, „I_kor“, a tiež príslušného scenára zraniteľnosti „V_s“, prípadne nízkej reziliencie „L_s“, ako aj kvality údajov a neistoty výsledku.

Komplexný index prioritizácie P_s môže slúžiť na počítačové zoradenie JPRL, ale sám neurčuje opatrenie. Vždy sa číta spolu s poľom „dom_mech“. Ak dve JPRL dosiahnu rovnakú výslednú triedu, ale v jednej dominuje antropogénna iniciačná predispozícia a v druhej štruktúrny korunový potenciál, ich preventívny manažment musí byť odlišný.

Kvalita údajov a neistota ovplyvňujú poradie následných krokov. Vysoká priorita pri dobrej dátovej podpore je vhodným podkladom pre plánovanie konkrétneho opatrenia. Vysoká priorita pri vysokej neistote je prioritou na terénne overenie, nie automaticky na nákladný zásah. Nízka priorita pri vysokej neistote sa nepovažuje za potvrdené bezpečné územie a zaradí sa do programu aktualizácie údajov (Scott et al., 2013).

Priestorová prioritizácia má zostať kompatibilná s metodikou kapitoly 9. To znamená, že hranice tried, váhy a scenáre sa nemenia ručne podľa očakávaného výsledku. Ak je potrebné iné rozhodovacie hľadisko, vytvorí sa nový scenár s vlastným identifikátorom a výsledok sa archivuje ako samostatný analytický beh.

Interpretačné pravidlá pre kombináciu priority a neistoty sú uvedené v tabuľke 61.

Tabuľka 61 Interpretačné pravidlá priority vo vzťahu ku kvalite a neistote

Výsledná priorita	Kvalita / neistota	Odporúčany prvý krok	Interpretácia
vysoká	dobrá kvalita / nižšia neistota	miestne overenie rozsahu a príprava opatrenia	robustnejší podklad pre rozhodovanie
vysoká	nižšia kvalita / vyššia neistota	prednostné terénne overenie a doplnenie údajov	priorita je signál na preverenie, nie automatický zásah
stredná	dobrá kvalita / nižšia neistota	sledovanie a porovnanie s ostatnými prioritami	opatrenie podľa dominantného mechanizmu a kapacít
stredná	vyššia neistota	zaradiť do doplnkového zisťovania	poradie môže byť nestabilné

Výsledná priorita	Kvalita / neistota	Odporúčaný prvý krok	Interpretácia
nízka	dobrá kvalita / nižšia neistota	bežný režim monitorovania	nižšia priorita v danom scenári
nízka	vyššia neistota	neinterpretovať ako potvrdené nízke riziko; doplniť údaje	nedostatok informácie môže maskovať lokálny problém

11.7. Využitie výsledkov pri tvorbe plánov ochrany pred požiarmi

Výsledky monografie možno použiť ako odborný dátový podklad pri tvorbe a aktualizácii dokumentácie a plánovacích podkladov ochrany pred požiarmi. Ich aplikácia musí rešpektovať platné kompetencie, povinnosti a formu dokumentácie podľa zákona č. 314/2001 Z. z. o ochrane pred požiarmi a príslušných vykonávacích predpisov, najmä vyhlášky č. 121/2002 Z. z. o požiarnej prevencii v znení neskorších predpisov.

Analytické vrstvy môžu plánovanie doplniť o informácie, ktoré bežná lesnícka alebo topografická mapa neposkytuje: dominantný palivový nositeľ, povrchový a korunový potenciál, aktuálny stav nebezpečenstva, zraniteľné hodnoty, kvalitu údajov a neistotu. Zásadné je, aby sa tieto vrstvy uchovávali oddelene a aby sa v pláne neprezentovala jedna farba komplexného indexu bez vysvetlenia dominantného mechanizmu.

Pre plánovací účel sa odporúča vytvoriť stabilnú statickú prílohu a dynamickú operačnú prílohu. Statická časť obsahuje dlhodobejšiu náchylnosť, palivové modely, vrstvy „I_pov“, „I_kor“, dostupnosť, vodné zdroje, expozíciu a tematickú zraniteľnosť. Dynamická časť obsahuje vrstvy „H_akt“, „I_vznik“ a prípadné krátkodobé scenáre šírenia s uvedeným časom platnosti.

Plánovanie má zahŕňať aj režim aktualizácie. Po ťažbe, kalamite, požiari, rozsiahlejšom odumieraní alebo preventívnom zásahu sa overuje platnosť palivových vrstiev. Po zmene vstupov alebo analytickej metodiky sa vytvára nová verzia produktu, nie ručná oprava existujúcej mapy. Tento postup nadväzuje na kapitoly 4, 9 a 10.

11.8. Podpora krízového riadenia a civilnej ochrany

Požiar v prírodnom prostredí môže prerásť z lesníckeho a protipožiarneho problému do mimoriadnej udalosti s dôsledkami pre obyvateľstvo, dopravu, technickú infraštruktúru, zásobovanie, rekreačné územia a životné prostredie. Preto je potrebné požiarne vrstvy prepájať s expozíciou osôb a chránených hodnôt. V zmysle zákona č. 42/1994 Z. z. je civilná ochrana zameraná na ochranu života, zdravia a majetku pred následkami mimoriadnych udalostí; analytické výstupy monografie môžu túto prípravu podporiť ako odborný priestorový podklad.

V krízovom riadení sa expozícia vedie ako samostatná vrstva. Nesmie sa spätne započítavať do „S_vznik“ alebo „I_pov“. Tým sa zachová rozdiel medzi tým, kde môže požiar vzniknúť a šíriť sa, a tým, čo môže byť jeho účinkami zasiahnuté. Až následná scenárová kombinácia umožní určiť lokality, kde sa vysoký požiarový potenciál stretáva s vysokou koncentráciou chránených hodnôt.

Osobitné postavenie majú kontaktné územia lesa a zástavby. Pri nich sa okrem paliva hodnotí usporiadanie objektov, prístupové a únikové komunikácie, možné bariéry, vodné zdroje, lokalizácia zraniteľných osôb alebo zariadení a možnosti včasného varovania. Calkin et al. (2014) zdôrazňujú

význam riadenia rizika priamo v kontaktnom priestore medzi vegetáciou a chránenými objektmi, čo podporuje oddelené hodnotenie paliva a expozície.

Výsledky sú vhodné aj na prípravu cvičení. Scenár sa zostavuje zo skutočných analytických vrstiev a vopred definovaných meteorologických podmienok. Môže kombinovať vysoké H_{akt} , rýchle povrchové šírenie, nepriaznivý korunový potenciál, obmedzenú dostupnosť a vysokú infraštruktúro-spoločenskú zraniteľnosť. Cieľom cvičenia nie je potvrdiť správnosť mapy, ale preveriť rozhodovacie, komunikačné a logistické postupy pri konkrétnej kombinácii podmienok.

11.9. Prepojenie výsledkov s klimatickou adaptáciou a manažmentom krajiny

Klimatická adaptácia vyžaduje odlišovať krátkodobé zvýšenie požiarneho nebezpečenstva od dlhodobej zmeny palivového prostredia. Rastúca teplota a častejšie alebo dlhšie obdobia sucha menia vlhkosť paliva, ale zároveň môžu prostredníctvom stresu, mortality a disturbancií meniť množstvo a priestorové usporiadanie paliva. Európske hodnotenie klimatických rizík upozorňuje, že klimatické riziká pre ekosystémy, infraštruktúru, vodné zdroje a obyvateľstvo sa v Európe zvyšujú a vyžadujú systematické adaptačné rozhodovanie (European Environment Agency, 2024).

Pre klimatickú adaptáciu sa preto neodporúča jednoducho premietnuť dnešnú mapu rizika do budúcnosti. Vhodnejší je scenárový postup. Menia sa klimatické a vegetačné vstupy, ale palivové charakteristiky sa aktualizujú iba prostredníctvom biologicky a lesnícky odôvodneného scenára zmeny porastu, mortality, obnovy alebo manažmentu. Výsledkom je porovnanie alternatívnych budúcich palivových stavov, nie deterministická predpoveď.

Na krajinnej úrovni je dôležité sledovať kontinuitu paliva naprieč hranicami JPRL. Opatrenie, ktoré zníži rizikový mechanizmus v jednej jednotke, môže mať obmedzený účinok, ak naň nadväzuje rozsiahla súvislá palivová plocha. Strategické plánovanie preto kombinuje porastovú mierku s krajinným usporiadaním, polohou sídel, dopravných koridorov, rekreačných území a území s vysokou ekologickou alebo pôdoochrannou hodnotou.

Klimatická adaptácia musí rešpektovať aj ekologické funkcie odumretej biomasy a štruktúrnej heterogenity. Cieľom nie je minimalizovať množstvo paliva vo všetkých lesoch, ale znižovať konkrétne nepriaznivé palivové konfigurácie tam, kde sa preukázateľne spájajú s vysokou prioritou a zraniteľnými hodnotami. Takto možno protipožiarne opatrenia prepájať s hospodárskou stabilitou, ochranou biodiverzity a obnovou ekosystémov.

Zákon č. 326/2005 Z. z. o lesoch v znení neskorších predpisov vytvára právny rámec hospodárenia a ochrany lesov; využitie výsledkov tejto monografie je preto potrebné začleňovať do existujúcich procesov lesného hospodárstva, nie vytvárať paralelný plánovací systém.

11.10. Praktické odporúčania pre ďalšie využívanie výstupov

Praktické využitie výsledkov sa má riadiť jednotným rozhodovacím cyklom. Najskôr sa určí účel rozhodovania a vyberie príslušný scenár alebo analytická vrstva. Následne sa skontroluje verzia, čas platnosti, kvalita údajov a neistota. Až potom sa identifikuje dominantný mechanizmus, vyberie predbežné opatrenie a vykoná miestne overenie. Po realizácii opatrenia sa aktualizujú zmenené palivové vrstvy a analytický beh sa zopakuje.

Výstupy sa nemajú používať ako izolované mapové obrázky. Pre rozhodovanie musí byť dostupná hodnota indexu, dominantný mechanizmus, kvalita údajov, neistota, zdrojová vrstva a verzia analytického behu. Distribučný produkt má byť prepojený s interpretačnou kartou podľa kapitoly 10, aby používateľ poznal vhodnú mierku, čas platnosti a obmedzenia použitia.

Pri každom využití platí zásada primeranosti mierky. Národné a regionálne výstupy slúžia na strategickú prioritizáciu a výber miest na podrobnejšie zisťovanie. Lokálny návrh zásahu, úpravy paliva alebo evakuačného scenára si vyžaduje aktuálne miestne údaje. Technická mriežka 10 × 10 m sama osebe neoprávňuje používateľa interpretovať všetky vstupy ako lokálne meranie na tejto ploche.

Výsledky sa majú používať iteratívne. Preventívne opatrenie, hospodársky zásah, disturbancia alebo požiar menia palivové prostredie a tým aj platnosť pôvodnej analýzy. Účinnosť opatrenia sa preto nehodnotí ručným prefarbením výslednej triedy, ale novým meraním alebo odvodením palivových parametrov a opakovaním rovnakého analytického postupu.

Súhrnný rozhodovací cyklus a povinné kontrolné body sú uvedené v tabuľke 62.

Tabuľka 62 Odporúčaný cyklus praktického využitia analytických výstupov

Krok	Činnosť	Povinná kontrola	Výstup
1	určiť rozhodovací účel a scenár	či ide o prevenciu vzniku, šírenie, ochranu hodnôt, obnovu alebo operačný účel	zvolený súbor vrstiev
2	načítať poslednú platnú verziu	verzia_beh, dátum platnosti, zdroj dynamických údajov	kontrolovaný analytický produkt
3	posúdiť kvalitu a neistotu	kval_dat, neistota, podiel extrapolácie a dátovej podpory	rozhodnutie o použiteľnosti
4	určiť dominantný mechanizmus	dom_mech a čiastkové vrstvy	vecné vysvetlenie priority
5	navrhnuť predbežné opatrenie	väzba opatrenia na konkrétny mechanizmus	návrh opatrenia alebo potreba doplniť údaje
6	vykonať miestne overenie	aktuálny stav paliva, prístupnosť, expozícia, právne a ekologické obmedzenia	potvrdené alebo upravené opatrenie
7	realizovať a zdokumentovať zmenu	rozsah, dátum, spôsob zásahu	záznam o opatrení
8	aktualizovať relevantné vrstvy	neprepisovať pôvodnú verziu; vytvoriť nový produkt	nová verzia palivových a hodnotiacich vrstiev
9	zopakovať analytický beh	rovnaká alebo explicitne nová metodika	porovnateľný výsledok pred/po opatrení
10	archivovať a publikovať výsledok	väzba na poznatkovú bázu a interpretačnú kartu	sledovateľný a opakovateľný rozhodovací záznam

Takto nastavené aplikačné pravidlá prepájajú vedecké a metodické výsledky monografie s rozhodovacou praxou bez straty ich pôvodného významu. Základným princípom zostáva, že mapa ani index nie sú rozhodnutím. Rozhodnutie vzniká až spojením analytického výsledku s jeho neistotou, miestnym overením, konkrétnym cieľom ochrany a platnými organizačnými, hospodárskymi a právnymi podmienkami.

Aplikačná hodnota metodiky preto spočíva najmä v transparentnosti. Pri každom opatrení možno späťne určiť, z akých údajov vychádzalo, ktorý mechanizmus bol považovaný za dominantný, aké obmedzenia

boli známe a ako sa stav po zásahu zmenil. Tým sa uzatvára celý metodický reťazec monografie od terénneho merania lesného paliva až po jeho opakovateľné využitie v protipožiarnej ochrane, lesnom hospodárstve a krízovom riadení.

ZÁVER

Predložená monografia sa zaoberá lesným palivom Slovenska, jeho terénnym zisťovaním, priestorovým mapovaním, klasifikáciou, hodnotením požiarnych vlastností a využitím získaných a odvodených údajov pri hodnotení požiarneho rizika v lesnom prostredí. Východiskom práce je chápanie paliva ako základnej materiálnej podmienky vzniku a ďalšieho rozvoja požiaru. Palivo v tomto kontexte nepredstavuje iba opisnú charakteristiku lesného porastu, ale súbor fyzikálnych, priestorových a materiálových vlastností, ktoré ovplyvňujú možnosť iniciácie horenia, jeho udržanie, povrchové šírenie, vertikálny prechod do vyšších vrstiev porastu a za vhodných podmienok aj rozvoj korunového požiaru.

Základným metodickým východiskom monografie je skutočnosť, že hodnotenie požiarneho rizika v lesoch Slovenskej republiky nemožno založiť iba na historickom výskyte požiarov, meteorologických ukazovateľoch alebo všeobecných porastových charakteristikách. Tieto údaje poskytujú významnú časť informácie, ale samy osebe nevystihujú stav palivového komplexu. Pre odborné hodnotenie je potrebné poznať druh a množstvo paliva, jeho horizontálnu a vertikálnu kontinuitu, priestorové usporiadanie jednotlivých palivových vrstiev, aktuálny vlhkosťný stav a vlastnosti relevantné pre zapálenie, tepelný rozklad a horenie.

Jedným z hlavných prínosov monografie je vytvorenie metodického rámca pre systematické zisťovanie povrchového, rebríkového a korunového paliva. Terénna metodika je založená na priestorovo jednoznačne definovanom palivovom profile, v ktorom sa osobitne zaznamenávajú parametre jednotlivých palivových vrstiev. Takéto členenie umožňuje odlíšiť palivo významné pre iniciáciu a povrchové šírenie od paliva vytvárajúceho vertikálne prepojenie a od paliva tvoriaceho korunovú vrstvu. Zároveň umožňuje zachovať väzbu medzi nameranou hodnotou, spôsobom jej odvodenia a priestorovou podporou, ku ktorej sa údaj vzťahuje.

Na terénne zisťovanie nadväzuje návrh geodatabázy lesného paliva Slovenska. Geodatabáza je koncipovaná ako analytické dátové jadro, v ktorom možno prepájať údaje o povrchovom, rebríkovom a korunovom palive s lesníckymi, topografickými, environmentálnymi a diaľkovo snímanými údajmi. Zároveň umožňuje evidovať pôvod údajov, spôsob jeho získania alebo odvodenia, metodickú verziu, dátovú podporu a neistotu. Výsledné mapové vrstvy tak nevznikajú ako izolované produkty, ale ako súčasť sledovateľného a reprodukovateľného dátového systému.

Osobitná pozornosť bola venovaná priestorovému odvodeniu povrchového paliva. Povrchová vrstva predstavuje rozhodujúce prostredie pre iniciáciu a počiatočné šírenie väčšiny lesných požiarov. Pri jej hodnotení preto nestačí pracovať s jednou celkovou hodnotou množstva paliva. Metodika rozlišuje jednotlivé palivové komponenty, najmä jemné odumreté palivo, bylinnú a krovinnú zložku, opad, hrabanku a ležiace drevo, a súčasne zohľadňuje ich horizontálnu kontinuitu, priestorovú variabilitu a funkciu pri šírení požiaru.

Na povrchovú vrstvu nadväzuje hodnotenie rebríkového a korunového paliva. Pre potenciál vertikálneho prechodu požiaru je významná najmä prítomnosť rebríkového paliva, počet a rozmiestnenie vertikálne obsadených vrstiev, medzery medzi nimi a výška korunovej bázy. Pre možnosť udržania horenia v korunovej vrstve sú dôležité najmä objemová hustota korunového paliva a horizontálna kontinuita korún. Samotná prítomnosť korunovej biomasy preto neznamená automaticky vysoký potenciál korunového

požiaru. Rozhodujúca je kombinácia povrchového požiaru, vertikálneho prepojenia paliva, vlastností korunovej vrstvy, vlhkosti, vetra a topografie.

Metodika tvorby palivových modelov nadväzuje na tieto fyzikálne a priestorové charakteristiky. Palivový model sa nechápe ako botanická alebo typologická kategória porastu, ale ako zjednodušený opis palivového lôžka určený na modelovanie správania povrchového požiaru. Typologické a porastové charakteristiky možno použiť na predbežné zúženie súboru potenciálne vhodných palivových modelov, samotné priradenie sa však uskutočňuje až na základe palivových charakteristík zistených alebo odvodených pre konkrétnu priestorovú jednotku. Tým sa zachováva rozdiel medzi primárnymi fyzikálnymi údajmi o palive a ich následnou klasifikáciou.

Dôležitou súčasťou metodického systému je prepojenie mapovania paliva s jeho požiarovými vlastnosťami. Laboratórne hodnotenie poskytuje informácie o správaní konkrétneho palivového komponentu pri presne definovaných skúšobných podmienkach. Zapáliteľnosť, vlhkosť, priebeh tepelného rozkladu, termická analýza, množstvo popola, spalné teplo a výhrevnosť umožňujú lepšie vysvetliť materiálové vlastnosti jednotlivých zložiek paliva. Laboratórna hodnota sa však nevzťahuje automaticky na celý lesný porast, rastrovú bunku alebo palivový model. Je viazaná na konkrétny typ paliva, stav vzorky a skúšobný protokol.

Osobitne významná je väzba medzi vlhkosťou a zapáliteľnosťou paliva. Monografia preto nevychádza z predpokladu jednej univerzálnej kritickej hodnoty vlhkosti. Vlhkostná odozva sa hodnotí pre konkrétny palivový komponent a konkrétne experimentálne podmienky. Ak sú k dispozícii dostatočné údaje, možno odvodiť prechodové pásmo alebo kalibrovaný vzťah medzi vlhkosťou a pravdepodobnosťou úspešného zapálenia. Takto získaná informácia sa nesmie zamieňať s modelovou vlhkosťou zániku používanou v systémoch modelovania správania požiaru.

Na priestorové a materiálové hodnotenie paliva nadväzuje metodika hodnotenia požiarneho rizika. V nej sa dôsledne rozlišuje dlhodobější náchylnosť územia na vznik požiaru, aktuálne nebezpečenstvo vzniku požiaru, potenciál povrchového šírenia požiaru, štruktúrny potenciál vertikálneho prechodu a korunového šírenia, zraniteľnosť a reziliencia. Takéto členenie zabraňuje tomu, aby sa rozdielne mechanizmy spájali do jedného neinterpretovateľného ukazovateľa.

Náchylnosť na vznik požiaru vyjadruje dlhodobější priestorové predpoklady úspešnej iniciácie. Aktuálne nebezpečenstvo vzniku požiaru zachytáva krátkodobu premenlivý stav prostredia, najmä vlhkostné a meteorologické podmienky ovplyvňujúce dostupnosť jemného paliva pre zapálenie a udržanie horenia. Ich kombináciou možno vytvoriť aktuálny index rizika vzniku požiaru, ktorý však bez zodpovedajúcej kalibrácie nepredstavuje pravdepodobnosť vzniku konkrétneho požiaru.

Po vzniku požiaru sa samostatne hodnotí potenciál jeho ďalšieho šírenia. Potenciál povrchového šírenia požiaru je viazaný na povrchový palivový komplex, palivový model, sklon, vietor a aktuálne podmienky. Štruktúrny potenciál vertikálneho prechodu a korunového šírenia vychádza z rebríkového paliva, výšky korunovej bázy, objemovej hustoty korunového paliva a horizontálnej kontinuity korunovej vrstvy. Takéto oddelenie umožňuje identifikovať, či je v konkrétnom území dominantným problémom iniciácia, povrchové šírenie alebo prechod požiaru do vyšších vrstiev porastu.

Zraniteľnosť sa hodnotí oddelene od pravdepodobnosti alebo potenciálu požiaru. Vyjadruje citlivosť ekologických, pôdno-hydrologických, produkčných, spoločenských alebo infraštruktúrnych hodnôt na účinky požiaru. Reziliencia predstavuje schopnosť systému zachovať alebo obnoviť svoje kľúčové

funkcie po požiaroch a nemožno ju chápať iba ako matematický opak zraniteľnosti. Rozlíšenie týchto zložiek umožňuje zostavovať rôzne rozhodovacie scenáre podľa toho, aký predmet ochrany je v konkrétnej analýze prioritný.

Komplexný výsledok hodnotenia má charakter prioritizačného indexu. Jeho cieľom nie je nahradiť čiastkové analytické vrstvy, ale umožniť zoradenie území podľa zvoleného rozhodovacieho scenára. Pri každom výsledku musí zostať dostupná informácia o dominantnom mechanizme. Rovnaká výsledná priorita totiž môže byť dôsledkom vysokej náchylnosti na vznik požiaru, nepriaznivého potenciálu šírenia, vysokej zraniteľnosti alebo nízkej reziliencie, pričom každá z týchto situácií vyžaduje odlišné opatrenie.

Významným prvkom metodiky je agregácia výsledkov na úroveň JPRL. Umožňuje prepájať rastrové analytické výstupy s jednotkami využiteľnými v lesníckej a plánovacej praxi. Agregácia však nesmie odstrániť informáciu o vnútornej heterogenite porastovej jednotky. Pri spojitých údajoch sa preto popri základnej centrálnej charakteristike uchováajú aj údaje o variabilite a vybraných horných percentiloch, pri kategorizovaných vrstvách dominantná trieda a plošné zastúpenie jednotlivých tried. Takýto postup umožňuje identifikovať aj menšie časti JPRL s významne odlišnou palivovou alebo rizikovou charakteristikou.

Neoddeliteľnou súčasťou všetkých výsledkov je neistota. Jej zdrojom môže byť prirodzená variabilita paliva, obmedzený počet terénnych meraní, neistota priestorového modelu, rozdielna informačná podrobnosť vstupných údajov, neaktuálnosť lesníckych podkladov alebo extrapolácia mimo rozsahu kalibračných údajov. Mimoriadnu pozornosť si vyžadujú územia po kalamite, ťažbe, požiaroch, rozsiahlejšom odumieraní alebo inom zásahu, ktorý významne zmenil palivový komplex. V takýchto prípadoch je zmena stavu spúšťačom kontroly platnosti existujúcich vrstiev a podľa potreby nového terénneho zisťovania alebo priestorového odvodenia.

Z metodického systému vyplýva, že manažment požiarov v lesnom prostredí musí vychádzať z poznania paliva, ale nemôže sa obmedziť na jeho množstvo. Rozhodujúce je, ktorá palivová zložka je v konkrétnom priestore nositeľom iniciácie alebo šírenia, ako je usporiadaná, aký je jej vlhkosťový stav a akým spôsobom je prepojená s ostatnými vrstvami palivového komplexu. Rovnaké množstvo biomasy môže vytvárať veľmi rozdielne podmienky podľa jej veľkostnej štruktúry, polohy a kontinuity.

Manažment paliva pritom nemožno chápať ako plošné odstraňovanie organickej hmoty z lesa. Opad, hrabanka, odumreté drevo a ďalšie organické zložky plnia významné ekologické, pôdoochranné, hydrologické a biotopové funkcie. Cieľom je identifikovať konkrétne nepriaznivé palivové konfigurácie a cielene meniť tie vlastnosti palivového komplexu, ktoré súvisia s dominantným mechanizmom požiarneho rizika. V jednom území môže ísť o jemné povrchové palivo, v inom o jeho horizontálnu kontinuitu, rebríkové palivo alebo nepriaznivú štruktúru korunovej vrstvy.

Aplikačný význam výsledkov spočíva v možnosti využívať ich pri prevencii lesných požiarov, manažmente paliva, hodnotení plôch po ťažbe a kalamitných plôch, plánovaní hospodárskych zásahov, príprave podkladov pre protipožiarnu ochranu, zásahovom plánovaní, hodnotení kontaktných území lesa a zástavby, krízovom riadení, civilnej ochrane a klimatickej adaptácii. Výstupy nenahrádzajú odborné rozhodnutie ani miestny terénny prieskum. Poskytujú však jednotný, sledovateľný a zdokumentovaný podklad, na základe ktorého možno rozhodnutie lepšie odôvodniť a následne vyhodnotiť jeho účinok.

Poznatková báza vytvára nadstavbu nad analytickou geodatabázou a umožňuje systematicky sprístupňovať mapové vrstvy, metodiky, experimentálne údaje, metadáta, validačné informácie, verzie analytických behov a interpretačné materiály. Jej význam spočíva aj v tom, že používateľ nemá k dispozícii iba výslednú mapu alebo triedu, ale môže zistiť pôvod údajov, význam výslednej veličiny, čas jej platnosti, dominantný mechanizmus, informačnú podporu a obmedzenia použitia.

Ďalší rozvoj metodiky bude závisieť predovšetkým od rozširovania siete referenčných terénnych meraní, zvyšovania kvality a aktuálnosti údajov diaľkového prieskumu Zeme a leteckého laserového skenovania, dopĺňania experimentálnych údajov o požiarnych vlastnostiach jednotlivých palivových komponentov a dlhodobého overovania navrhnutých analytických postupov. Potrebné bude tiež priebežne hodnotiť prenositeľnosť palivových modelov, spresňovať vzťahy medzi vlhkosťou a zapáliteľnosťou a overovať jednotlivé zložky rizikového modelu na nezávislých priestorových a časových údajoch.

Predložená monografia tak vytvára odborný a metodický základ pre systematické hodnotenie lesného paliva v podmienkach Slovenskej republiky. Jej hlavný prínos spočíva v prepojení terénneho zisťovania, priestorového modelovania, geodatabázového spracovania, palivových modelov, experimentálneho hodnotenia požiarnych vlastností, hodnotenia požiarneho rizika a praktického využitia výsledkov do jedného logického a opakovateľného systému.

Takto koncipovaný prístup umožňuje rozlišovať, kde je rozhodujúcim problémom vznik požiaru, kde jeho povrchové alebo vertikálne šírenie, kde vysoká zraniteľnosť chránených hodnôt a kde aktuálny stav prostredia podporujúci zapálenie a horenie. Zároveň umožňuje ku každému z týchto problémov priradiť odlišný typ preventívneho, manažérskeho, ochranného alebo operačného opatrenia. Práve schopnosť prejsť od zistenia a charakterizácie paliva cez vysvetlenie jeho úlohy pri požiari až k zdokumentovanému rozhodnutiu predstavuje podstatný aplikačný prínos navrhnutého metodického systému.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

ABDOLLAHI, Arnick a Marta YEBRA, 2023. Forest fuel type classification: Review of remote sensing techniques, constraints and future trends. *Journal of Environmental Management*. 342, 118315. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118315>.

ABDOLLAHI, Arnick a Marta YEBRA. 2025. Challenges and Opportunities in Remote Sensing-Based Fuel Load Estimation for Wildfire Behavior and Management: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*. 17(3), 415. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs17030415>.

AGEE, James K. a Carl N. SKINNER, 2005. Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecology and Management*. 211(1–2), 83–96. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.01.034>.

ANDERSEN, Hans-Erik, Robert J. MCGAUGHEY a Stephen E. REUTEBUCH, 2005. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment*. 94(4), 441–449. ISSN 0034-4257. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.013>

ANDERSON, Hans-Erik, 1982. *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. General Technical Report INT-122. Ogden, Utah: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 22 s. Dostupné z: <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-122>

ARAGONESES, Elena, Mariano GARCÍA, Michele SALIS, Luís M. RIBEIRO a Emilio CHUVIECO, 2023. Classification and mapping of European fuels using a hierarchical, multipurpose fuel classification system. *Earth System Science Data*. 15(3), 1287–1315. ISSN 1866-3508. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/essd-15-1287-2023>

ARAGONESES, Elena, Mariano GARCÍA, Paloma RUIZ-BENITO a Emilio CHUVIECO, 2024. Mapping forest canopy fuel parameters at European scale using spaceborne LiDAR and satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 303, 114005. ISSN 0034-4257. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114005>

BARON, Jennifer N., Paul F. HESSBURG, Marc-André PARISIEN, Gregory A. GREENE, Sarah E. GERGEL a Lori D. DANIELS. 2024. Fuel types misrepresent forest structure and composition in interior British Columbia: a way forward. *Fire Ecology*. 20, 15. DOI 10.1186/s42408-024-00249-z.

BRADSHAW, Larry S., John E. DEEMING, Robert E. BURGAN a Jack D. COHEN. 1984. *The 1978 National Fire-Danger Rating System: Technical Documentation*. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. General Technical Report INT-169. 44 s.

BROWN, James K. 1974. *Handbook for inventorying downed woody material*. General Technical Report INT-16. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 24 s.

BROWN, James K. a Jane Kapler SMITH, eds. 2000. *Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Flora*. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. General Technical Report RMRS-GTR-42, vol. 2. 257 s.

BYRAM, George M. 1959. Combustion of forest fuels. In: Kenneth P. DAVIS, ed. *Forest Fire: Control and Use*. New York: McGraw-Hill, s. 61–89.

CALKIN, Dave E., Jack D. COHEN, Mark A. FINNEY a Matthew P. THOMPSON, 2014. How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 111(2), 746–751. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.1315088111>.

CAMPBELL, Michael J., Philip E. DENNISON, Andrew T. HUDAK, Lucy M. PARHAM a Bret W. BUTLER. 2018. Quantifying understory vegetation density using small-footprint airborne lidar. *Remote Sensing of Environment*. 215, 330–342. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.023>.

CASTELLS, Blanca, Isabel AMEZ, Ljiljana MEDIC, Nieves FERNANDEZ-ANEZ a Javier GARCIA-TORRENT, 2021. Study of lignocellulosic biomass ignition properties estimation from thermogravimetric analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 71, 104425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104425>

CONGALTON, Russell G. a Kass GREEN. 2019. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. 3. vyd. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1-4987-7666-0.

CRUZ, Miguel G., Martin E. ALEXANDER a Ronald H. WAKIMOTO. 2004. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science*. 2004, 50(4), 640–658.

CRUZ, Miguel G., Martin E. ALEXANDER a Ronald H. WAKIMOTO. 2004. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science*. 2004, 50(4), 640–658.

DATAcite METADATA WORKING GROUP, 2026. *DataCite Metadata Schema for the Publication and Citation of Research Data and Other Research Outputs. Version 4.7* [online]. DataCite e.V. [cit. 2026-04-09]. Dostupné z: <https://doi.org/10.14454/qdd3-ps68>

DIMITRAKOPOULOS, Alexandros P. a Konstantinos K. PAPAIOANNOU. 2001. Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology*. 2001, 37(2), 143–152. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/A:1011641601076>.

DRYSDALE, Dougal, 2011. *An Introduction to Fire Dynamics*. 3. vyd. Chichester: John Wiley & Sons. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781119975465>

EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH AND INNOVATION, 2022. *Open Science and Intellectual Property Rights* [online]. Luxembourg: Publications Office of the European Union [cit. 2026-04-09]. Dostupné z: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/open-science-and-intellectual-property-rights_en

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2024. *European Climate Risk Assessment*. EEA Report No 01/2024 [online]. Copenhagen: European Environment Agency [cit. 2026-08-13]. ISBN 978-92-9480-627-7.

FINNEY, Mark A., 2005. The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management*. 211(1–2), 97–108. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.010>

FOSBERG, Michael A. 1970. Drying rates of heartwood below fiber saturation. *Forest Science*. 1970, 16(1), 57–63.

GALE, Matthew G., Geoffrey J. CARY, Albert I. J. M. VAN DIJK a Marta YEBRA. 2021. Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour. *Remote Sensing of Environment*. 255, 112282. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112282>.

GEODETICKÝ A KARTOGRAFICKÝ ÚSTAV BRATISLAVA. 2026. ZBGIS – na stiahnutie. *Letecké laserové skenovanie a DMR* [online]. Bratislava: GKÚ [cit. 2026-05-12].

HAKKENBERG, Christopher R., Matthew L. CLARK, Tim BAILEY, Patrick BURNS a Scott J. GOETZ, 2024. Ladder fuels rather than canopy volumes consistently predict wildfire severity even in extreme topographic-weather conditions. *Communications Earth & Environment*. 5, 721. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01893-8>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2017. *ISO 18125:2017. Solid biofuels — Determination of calorific value* [online]. Geneva: ISO [cit. 2026-06-14]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/61517.html>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2022. *ISO 18122:2022. Solid biofuels — Determination of ash content* [online]. Geneva: ISO [cit. 2026-06-14]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/83190.html>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2023. *ISO 18134-3:2023. Solid biofuels — Determination of moisture content — Part 3: Moisture in general analysis sample* [online]. Geneva: ISO [cit. 2026-06-14]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/83193.html>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 2014. *ISO 19115-1:2014. Geographic information – Metadata – Part 1: Fundamentals* [online]. Geneva: International Organization for Standardization. [cit. 2026-05-27]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/53798.html>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 2023. *ISO 19157-1:2023. Geographic information – Data quality – Part 1: General requirements* [online]. Geneva: International Organization for Standardization. [cit. 2026-05-27]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/78900>.

JOINT RESEARCH CENTRE, 2026. *European Forest Fire Information System (EFFIS)* [online]. European Commission [cit. 2026-05-13]. Dostupné z: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>

JOLLY, W. Matt, Mark A. COCHRANE, Patrick H. FREEBORN, Zachary A. HOLDEN, Timothy J. BROWN, Grant J. WILLIAMSON a David M. J. S. BOWMAN. 2015. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*. 2015, 6, článok 7537. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>.

JOLLY, W. Matt, Patrick H. FREEBORN, Larry S. BRADSHAW, Jon WALLACE a Stuart BRITTAIN. 2024. Modernizing the US National Fire Danger Rating System, version 4: Simplified fuel models and improved live and dead fuel moisture calculations. *Environmental Modelling & Software*. 2024, 181, článok 106181. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106181>.

KEANE, Robert E. 2015. *Wildland Fuel Fundamentals and Applications*. Cham: Springer International Publishing. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09015-3>.

KEANE, Robert E., 2013. Describing wildland surface fuel loading for fire management: a review of approaches, methods and systems. *International Journal of Wildland Fire*. 22(1), 51–62. ISSN 1049-8001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1071/WF11139>

KOONTZ, Michael J., Malcolm P. NORTH, Chhaya M. WERNER, Stephen E. FICK a Andrew M. LATIMER, 2020. Local forest structure variability increases resilience to wildfire in dry western U.S. coniferous forests. *Ecology Letters*. 23(3), 483–494. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ele.13447>

KRIEGER FILHO, G. C., Franklin COSTA, Maria Giuliana Fontanelli TORRAGA, P. BUFACCHI, S. TRUBACHEV, I. SHUNDRINA a Oleg KOROBEINICHEV, 2022. Kinetic parameters and heat of reaction for forest fuels based on genetic algorithm optimization. *Thermochimica Acta*. 713, 179228. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179228>

KUTCHARTT, Erico, José Ramón GONZÁLEZ-OLABARRIA, Antoni TRASOBARES, Núria AQUILUÉ, Juan GUERRA-HERNÁNDEZ, Leónia NUNES, Ana Catarina SEQUEIRA, Brigitte BOTEQUIM, Marius HAUGLIN, Palaiologos PALAIOLOGOU, Adrian CARDIL, Martino ROGAI, Vassil VASSILEV, François PIMONT, Olivier MARTIN-DUCUP a Francesco PIROTTI, 2025. Satellite-based mapping of canopy fuels at the pan-European scale. *Geo-Spatial Information Science*. 28(4), 1465–1493. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10095020.2024.2429376>

MAJLINGOVÁ, Andrea, Maroš SEDLIAK a Róbert SMREČEK, 2018. Spatial distribution of surface forest fuel in the Slovak Republic. *Journal of Maps*. 14(2), 368–372. ISSN 1744-5647. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1480973>

MAJLINGOVÁ, Andrea, Erik PIATER, Radovan HILBERT a Tibor-Sándor KÁDÁR. 2026. Human-caused wildfires, climate anomalies, and fire impacts in Slovakia (2010–2025): Evidence from national fire statistics. *Fire*. 2026, 9(4), 158. DOI 10.3390/fire9040158.

MARCOZZI, Anthony, Lucas WELLS, Russell A. PARSONS, Eric MUELLER, Rodman LINN a J. Kevin HIERS. 2025. FastFuels: Advancing wildland fire modeling with high-resolution 3D fuel data and data assimilation. *Environmental Modelling & Software*. 183, 106214. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106214>.

MATTHEWS, Stuart. 2014. Dead fuel moisture research: 1991–2012. *International Journal of Wildland Fire*. 2014, 23(1), 78–92. Dostupné z: <https://doi.org/10.1071/WF13005>.

MELNIK, K. O., Bret W. BUTLER, N. CAMPBELL-LOCHRIE, R. G. KELSEY a J. Kevin HIERS, 2024. Effect of live/dead condition, moisture content and particle size on the flammability of wildland fuels. *International Journal of Wildland Fire*. 33. Dostupné z: <https://doi.org/10.1071/WF23167>

NÁRODNÉ LESNÍCKE CENTRUM. 2026. *Informačný systém lesného hospodárstva* [online]. Zvolen: Národné lesnícke centrum [cit. 2026-05-12].

NELSON, Ralph M. 2001. Water relations of forest fuels. In: Edward A. JOHNSON a Kiyoko MIYANISHI, eds. *Forest Fires: Behavior and Ecological Effects*. San Diego: Academic Press, s. 79–149. ISBN 978-0-12-386660-8.

OLOFSSON, Pontus, Giles M. FOODY, Martin HEROLD, Stephen V. STEHMAN, Curtis E. WOODCOCK a Michael A. WULDER, 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*. 148, 42–57. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>

OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM, 2023. *OGC Cloud Optimized GeoTIFF Standard. Version 1.0*. OGC 21-026 [online]. [cit. 2026-04-17]. Dostupné z: <https://docs.ogc.org/is/21-026/21-026.html>

OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM, 2024. *OGC GeoPackage Encoding Standard. Version 1.4.0*. OGC 12-128r19 [online]. [cit. 2026-04-17]. Dostupné z: <https://docs.ogc.org/is/12-128r19/12-128r19.html>

PRICHARD, Susan J., David V. SANDERSON, Roger D. OTTMAR, Elizabeth K. KELLER a Nancy H. FRENCH. 2023. Fuel characterization and consumption. In: Shankar P. MAHAJAN et al., eds. *Wildland Fire Emissions, Carbon, and Climate*. Cambridge: Cambridge University Press.

PRICHARD, Susan J., Eric ROWELL, Robert E. KEANE, Andrew T. HUDAK, Duncan C. LUTES a E. Louise LOUDERMILK. 2023. Wildland Fuel Characterization Across Space and Time. In: Tatiana V. LOBODA, Nancy H. F. FRENCH a Robin C. PUETT, eds. *Landscape Fire, Smoke, and Health: Linking Biomass Burning Emissions to Human Well-Being*. Hoboken: Wiley/American Geophysical Union, s. 53–68. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781119757030.ch4>.

PYNE, Stephen J., Patricia L. ANDREWS a Richard D. LAVEN. 1996. *Introduction to Wildland Fire*. 2. vyd. New York: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-54913-0.

REIN, Guillermo. 2013. Smouldering fires and natural fuels. In: Claire M. BELCHER, ed. *Fire Phenomena and the Earth System: An Interdisciplinary Guide to Fire Science*. Chichester: John Wiley & Sons, s. 15–33. ISBN 978-0-470-65748-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781118529539.ch2>.

ROBERTS, David R., Volker BAHN, Simone CIUTI, Mark S. BOYCE, Jane ELITH, Gurutzeta GUILLERA-ARROITA, Severin HAUENSTEIN, José J. LAHOZ-MONFORT, Boris SCHRÖDER, Wilfried THUILLER, David I. WARTON, Brendan A. WINTLE, Florian HARTIG a Carsten F. DORMANN, 2017. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography*. 40(8), 913–929. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ecog.02881>

ROTHERMEL, Richard C. 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Research Paper INT-115. 40 s.

SANDBERG, David V., Roger D. OTTMAR a Geoffrey H. CUSHON. 2001. Characterizing fuels in the 21st century. *International Journal of Wildland Fire*. 2001, 10(4), 381–387. Dostupné z: <https://doi.org/10.1071/WF01036>.

SCOTT, Andrew C. 2018. *Burning Planet: The Story of Fire Through Time*. Oxford: Oxford University Press. ISBN 978-0-19-873484-0.

SCOTT, Joe H. a Elizabeth D. REINHARDT, 2001. *Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior*. Research Paper RMRS-RP-29. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 59 s. Dostupné z: <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-29>

SCOTT, Joe H. a Robert E. BURGAN, 2005. *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. General Technical Report RMRS-GTR-153. Fort Collins, Colorado: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 72 s. Dostupné z: <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153>

SCOTT, Joe H., Matthew P. THOMPSON a Dave E. CALKIN, 2013. *A wildfire risk assessment framework for land and resource management*. General Technical Report RMRS-GTR-315. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 83 s. Dostupné z: <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-315>

SHAIK, Riyaz Uddien, Mohamad ALIPOUR, Kasra SHAMSAEI, Eric ROWELL, Bharathan BALAJI, Adam WATTS, Branko KOSOVIC, Hamed EBRAHIMIAN a Ertugrul TACIROGLU. 2025. Wildfire Fuels Mapping through Artificial Intelligence-based Methods: A Review. *Earth-Science Reviews*. 262, 105064. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105064>.

STEHRMAN, Stephen V. a Giles M. FOODY, 2019. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment*. 231, 111199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.018>

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION, 2017. *Disaster risk* [online]. Geneva: UNDRR [cit. 2026-03-07]. Dostupné z: <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk>

VAN WAGNER, C. E., 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*. 7(1), 23–34. Dostupné z: <https://doi.org/10.1139/x77-004>

VAN WAGNER, C. E., 1987. *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Forestry Technical Report 35. Ottawa: Canadian Forestry Service. 37 s.

VIEDMA, Olga, Carlos Alberto SILVA, José Manuel MORENO a Andrew T. HUDAK, 2024. LadderFuelsR: A new automated tool for vertical fuel continuity analysis and crown base height detection using light detection and ranging. *Methods in Ecology and Evolution*. 15, 1958–1967. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14427>

Vyhláška Ministerstva vnútra Slovenskej republiky č. 121/2002 Z. z. o požiarnej prevencii v znení neskorších predpisov

WILKINSON, Mark D., Michel DUMONTIER, IJsbrand Jan AALBERSBERG, Gabrielle APPLETON, Myles AXTON, Arie BAAK, Niklas BLOMBERG, Jan-Willem BOITEN, Luiz BONINO DA SILVA SANTOS, Philip E. BOURNE, Jildau BOUWMAN, Anthony J. BROOKES, Tim CLARK, Mercè CROSAS, Ingrid DILLO, Olivier DUMON, Scott EDMUNDS, Chris T. EVELO, Richard FINKERS, Alejandra GONZALEZ-BELTRAN, Alasdair J. G. GRAY, Paul GROTH, Carole GOBLE, Jeffrey S. GRETHE, Jaap HERINGA, Peter A. C. 'T HOEN, Rob HOOFT, Tobias KUHN, Ruben KOK, Joost KOK, Scott J. LUSHER, Maryann E. MARTONE, Albert MONS, Abel L. PACKER, Bengt PERSSON, Philippe ROCCA-SERRA, Marco ROOS, Rene VAN SCHAIK, Susanna-Assunta SANSONE, Erik SCHULTES, Thierry SENGSTAG, Ted

SLATER, George STRAWN, Morris A. SWERTZ, Mark THOMPSON, Johan VAN DER LEI, Erik VAN MULLIGEN, Jan VELTEROP, Andra WAAGMEESTER, Peter WITTENBURG, Katherine WOLSTENCROFT, Jun ZHAO a Barend MONS, 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*. 3, 160018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>

XI, Zhouxin, Laura CHASMER a Chris HOPKINSON. 2023. Delineating and Reconstructing 3D Forest Fuel Components and Volumes with Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sensing*. 15(19), 4778. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs15194778>.

YEBRA, Marta, Gianluca SCORTECHINI, Karine ADELIN, Nursema AKTEPE, Turkia ALMOUSTAFA, Avi BAR-MASSADA, María Eugenia BEGET, Matthias BOER, Ross BRADSTOCK, Tegan BROWN, Francesc Xavier CASTRO, Rui CHEN, Emilio CHUVIECO, Mark DANSON, Cihan Ünal DEĞİRMENCI, Ruth DELGADO-DÁVILA, Philip DENNISON, Carlos DI BELLA, Oriol DOMENECH, Jean-Baptiste FÉRET, Greg FORSYTH, Eva GABRIEL, Zisis GAGKAS, Fatma GHARBI, Elena GRANDA, Anne GRIEBEL, Binbin HE, Matt JOLLY, Ivan KOTZUR, Tineke KRAAIJ, Agnes KRISTINA, Pınar KÜTKÜT, Jean-Marc LIMOUSIN, M. Pilar MARTÍN, Antonio T. MONTEIRO, Marco MORAIS, Bruno MOREIRA, Florent MOUILLOT, Samukelisiwe MSWELI, Rachael H. NOLAN, Grazia PELLIZZARO, Yi QI, Xingwen QUAN, Victor RESCO DE DIOS, Dar ROBERTS, Çağatay TAVŞANOĞLU, Andy F. S. TAYLOR, Jackson TAYLOR, İrem TÜFEKCİOĞLU, Andrea VENTURA a Nicolas YOUNES CARDENAS. 2024. Globe-LFMC 2.0, an enhanced and updated dataset for live fuel moisture content research. *Scientific Data*. 2024, 11, článok 332. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03159-6>.

Zákon č. 314/2001 Z. z. o ochrane pred požiarimi v znení neskorších predpisov

Zákon č. 326/2005 Z. z. o lesoch v znení neskorších predpisov

Zákon č. 42/1994 Z. z. o civilnej ochrane obyvateľstva v znení neskorších predpisov

ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratka / symbol	Popis
1 h palivo	Najjemnejšia trieda odumretého paliva s rýchlou vlhkovou odozvou; významná najmä pri iniciácii horenia
10 h palivo	Jemné odumreté palivo s pomalšou vlhkovou odozvou ako 1 h palivo; významné pri počiatocnom šírení požiaru
100 h palivo	Hrubšia frakcia odumretého paliva významná najmä pri dlhšie trvajúcom suchu a udržaní horenia
1000 h palivo	Hrubé odumreté palivo s veľmi pomalou vlhkovou odozvou; významné pri dohorievaní a zásahovej náročnosti
A	Celková plocha hodnoteného územia
A_i	Plocha kategórie i v hodnotenom území
A_{zapal}	Antropogénny iniciačný faktor pri hodnotení náchylnosti na vznik požiaru
CBH	Výška korunovej základne
CBH_{norm}	Normalizovaná hodnota výšky korunovej základne
CBD	Hustota korunového paliva
CC	Korunový zápoj
C	Koeficient istoty klasifikácie
DEM	Digital Elevation Model; digitálny model reliéfu
DMP	Digitálny model povrchu
DMR	Digitálny model reliéfu
DPZ	Diaľkový prieskum Zeme
DTA	Diferenčná termická analýza
DSC	Diferenčná skenovacia kalorimetria
EFFIS	European Forest Fire Information System; Európsky informačný systém o lesných požiaroch
Ex	Expozícia hodnôt alebo vystavenie hodnôt pôsobeniu požiaru
F	Celkový počet alebo celková plocha historických požiarov
F_i	Počet alebo plocha požiarov v kategórii i
FBFM	Fire Behavior Fuel Models; palivové modely správania požiaru
FBFM13	Pôvodný súbor 13 palivových modelov správania požiaru
FBFM40	Rozšírený súbor 40 palivových modelov správania požiaru
$FineF$	Index jemného paliva
FM	Palivový model
FM_{ign}	Hodnotenie palivového modelu z hľadiska zapáliteľnosti
FM_{spread}	Hodnotenie palivového modelu z hľadiska rýchlosti šírenia požiaru
FR_i	Frekvenčný pomer pre kategóriu i
FWI	Fire Weather Index; meteorologický index požiarneho nebezpečenstva
GIS	Geografický informačný systém
GWIS	Global Wildfire Information System; Globálny informačný systém o požiaroch v prírodnom prostredí
H	Index požiarneho nebezpečenstva
H_{dry}	Index stavu sucha
H_{hist}	Historický faktor výskytu požiarov
HSLT	Hospodársky súbor lesných typov
I_{1h}	Index vlhkostnej dostupnosti 1 h paliva pre horenie
I_{10h}	Index vlhkostnej dostupnosti 10 h paliva pre horenie
I_{100h}	Index vlhkostnej dostupnosti 100 h paliva pre horenie

I_{jemne}	Výsledný index vlhkostnej dostupnosti jemného paliva
I_{vlh}	Index vlhkostnej dostupnosti paliva pre horenie
I_{gnL}	Hodnotenie zapáliteľnosti dominantného palivového komponentu
ISLHP	Informačný systém lesného hospodárstva
JPRL	Jednotka priestorového rozdelenia lesa
K_{fuel}	Palivový korekčný faktor
K_{palivo}	Palivový korekčný faktor používaný v mapovej algebre
LHE	Lesná hospodárska evidencia
LiDAR	Light Detection and Ranging; letecké laserové skenovanie
M_{akt}	Aktuálna vlhkosť paliva
M_{krit}	Kritická vlhkosť paliva
M_{crit}	Kritická vlhkosť paliva
M_w	Vlhkosť vzťahovaná na mokrú hmotnosť
NBR	Normalized Burn Ratio; normalizovaný index spálenia
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index; normalizovaný rozdielový vegetačný index
NLC	Národné lesnícke centrum
PM_{neb}	Hodnotenie palivového modelu z hľadiska požiarneho nebezpečenstva
$PM_{sirenie}$	Hodnotenie palivového modelu z hľadiska šírenia požiaru
PM_{zapal}	Hodnotenie palivového modelu z hľadiska zapálenia
PSL	Program starostlivosti o lesy
P_{zapal}	Palivová predispozícia na zapálenie
R	Index reziliencie alebo rizikový index podľa kontextu použitia
$R_{ignition}$	Aktuálne riziko vzniku požiaru
$R_{sirenie}$	Aktuálne riziko rýchleho šírenia požiaru
R_{vznik}	Aktuálne riziko vzniku požiaru
$R_{komplex}$	Komplexné požiarne riziko
$R_{nizka reziliencia}$	Riziková vrstva odvodená z nízkej reziliencie
Sev	Očakávaná závažnosť požiarneho pôsobenia
SHMÚ	Slovenský hydrometeorologický ústav
SK-FUEL-SR	Pracovné označenie geodatabázy lesného paliva Slovenskej republiky
SLT	Súbor lesných typov
STA	Simultánna termická analýza
S_{crown}	Index korunového potenciálu
$S_{fast spread}$	Náchylnosť na rýchle šírenie požiaru
$S_{ignition}$	Náchylnosť na vznik požiaru
S_{koruna}	Potenciál prechodu požiaru do korunovej vrstvy
S_{povrch}	Predispozícia povrchového paliva na šírenie požiaru
$S_{sirenie}$	Index náchylnosti na rýchle šírenie požiaru
S_{spread}	Náchylnosť na rýchle šírenie požiaru
S_{topo}	Topografická predispozícia šírenia požiaru
S_{vietor}	Veterný faktor šírenia požiaru
S_{vznik}	Index náchylnosti na vznik požiaru
TGA	Termogravimetrická analýza
T_{sucho}	Topograficko-mikroklimatická predispozícia na presychanie paliva
U	Index neistoty hodnotenia
U_{class}	Neistota klasifikácie
U_{data}	Neistota vyplývajúca z kvality a aktuálnosti vstupných údajov

U_{fuel}	Neistota palivovej klasifikácie
U_{hist}	Neistota historických údajov o požiaroch
$U_{heterogenita}$	Neistota vyplývajúca z vnútornej heterogenity JPRL
U_{palivo}	Neistota údajov o palive
V	Index zraniteľnosti
V_{celk}	Celková zraniteľnosť po zohľadnení závažnosti požiarneho pôsobenia
V_{eko}	Ekologická zraniteľnosť
V_{poda}	Pôdno-hydrologická zraniteľnosť
V_{prod}	Produkčná zraniteľnosť
V_{spol}	Spoločenská zraniteľnosť
WUI	Wildland-urban interface; kontaktné územia lesa alebo iného prírodného prostredia a zástavby
ZBGIS	Základná báza údajov pre geografický informačný systém
μ_{max}	Najvyššia miera príslušnosti k triede pri fuzzy klasifikácii
μ_2	Druhá najvyššia miera príslušnosti k triede pri fuzzy klasifikácii

REGISTER POJMOV

- Adaptačné opatrenia, 242
Atribútová štruktúra, 174
Bylinné palivo, 62, 184, 185
Citlivosť, 37, 57, 158, 159, 209, 222, 228, 233, 236, 238, 239, 242, 251
Civilná ochrana, 246
Cloud Optimized GeoTIFF, 177, 234, 258
Časové triedy, 31, 43
Dátový slovník, 72, 120, 173, 231, 232, 233, 234, 238, 239
Dial'kový prieskum Zeme, 5, 22, 33, 46, 47, 63
Digitálny model reliéfu, 76, 78, 261
Disturbancia, 185, 245, 248
Dlhodobá udržateľnosť, 238
Dohorievania, 39, 203
Dostupné palivo, 194
Drevinové zloženie, 4, 59, 60, 69, 73, 74, 76, 77, 78, 83, 101, 102, 105, 115, 118, 161, 183, 185, 186, 195, 201, 241
Dynamická vrstva, 132, 169, 188
Ekologická reziliencia, 223
Environmentálne údaje, 79, 85
Expozícia, 228, 244, 261
Fire Weather Index, 220, 259, 261
Geodatabáza, 22, 172, 177, 179, 188, 231, 233, 250
GIS, 109, 161, 163, 173, 220, 226, 261
Hodnotenie nebezpečenstva, 33, 171, 190, 198
Hodnotenie rizika, 52, 56
Horenie, 4, 8, 9, 10, 11, 14, 16, 19, 23, 24, 27, 34, 35, 36, 39, 41, 43, 44, 48, 49, 50, 52, 59, 86, 87, 100, 111, 147, 155, 162, 184, 189, 191, 193, 208, 209, 210, 211, 215, 240, 250, 253, 261, 262
Horizontálna kontinuita, 35, 39, 50, 51, 52, 54, 60, 65, 67, 97, 99, 100, 101, 109, 111, 112, 136, 137, 175, 187, 192, 193, 196, 220, 225, 228, 250
Horľavosť, 213
Hrabanka, 4, 11, 14, 22, 23, 28, 96, 109, 166, 181, 183, 185, 213, 252
Hrubé palivo, 15
Index prioritácie, 218, 226, 245
Intenzita čela požiaru úzko, 13
Jemné odumreté palivo, 4, 30, 32, 105, 184, 185, 261
Kalibrácia, 60, 85, 125, 139, 159, 195, 200, 203, 216
Klimatická adaptácia, 247
Kontaktné územia lesa a zástavby, 240, 246
Kontinuita paliva, 19, 33, 34, 39
Korunová biomasa, 4, 25
Korunová pokrývnosť, 26, 66, 68, 72, 101, 110, 112, 113, 116, 118, 125, 127, 136, 141, 149, 162, 164, 168, 175, 192, 193, 194, 196, 205
Korunové palivo, 25, 26, 27, 48, 61, 87, 101, 118, 131, 139, 167, 174, 175, 191
Korunový požiar, 11, 27
Kvalita údajov, 229, 245
Kvantifikácia paliva, 40
Laserové skenovanie, 37, 57, 92, 154
Lesné palivo, 4, 8, 14, 17, 18, 52, 55, 58, 61
Lesnícke údaje, 15, 57, 69, 76, 153, 195
Mapovanie, 56, 57, 59, 60, 62, 64, 68, 69, 151, 161, 240
Mapovanie paliva, 57, 67, 171, 181
Mapové vrstvy, 6, 233, 237, 250, 253
Metadáta, 63, 119, 120, 138, 160, 172, 177, 179, 230, 231, 232, 235, 236, 238, 239, 253
Modelovanie, 16, 17, 25, 33, 39, 58, 60, 64, 67, 69, 86, 105, 110, 116, 118, 120, 124, 126, 129, 157, 171, 173, 181, 186, 189, 194, 195, 199, 212, 214, 215, 230, 232, 240, 242, 251
Nebezpečenstvo vzniku požiaru, 9, 13, 24, 28, 58, 111, 189, 218, 219, 251
Neistota, 31, 45, 63, 76, 112, 127, 128, 131, 135, 137, 139, 145, 146, 150, 151, 152, 154, 155, 158, 159, 162, 164, 170, 172, 173, 175, 176, 178, 179, 188, 189, 197, 198, 203, 206, 207, 216, 219, 227, 228, 229, 230, 232, 233, 235, 238, 244, 245, 246, 247, 248, 252, 262, 263
Objemová hustota korunového paliva, 26, 50, 67, 103, 125, 135, 194, 196
Odumreté palivo, 16, 28, 30, 31, 42
Orientácia palivových častíc, 20
Palivová kontinuita, 34
Palivová predispozícia, 219, 220, 262
Palivové lôžko, 20, 45, 199, 200
Palivový komponent, 58, 86, 87, 89, 96, 208, 213, 214, 233, 251
Palivový model, 17, 25, 53, 58, 86, 199, 200, 206, 207, 214, 242, 251, 261
Podzemný požiar, 11, 23

Povrchové palivo, 14, 23, 24, 61, 87, 92, 96, 118, 139, 144, 174, 175, 181, 196
Poznatková báza, 231, 232, 236, 237, 239, 253
Presnosť, 21, 63, 114, 141, 143, 146
Prevencia, 240
Priestorová premenlivosť, 52
Raster, 38, 47, 52, 58, 65, 71, 84, 112, 131, 139, 141, 159, 174, 227, 228, 231, 232
Rebríkové palivo, 15, 25, 61, 66, 87, 96, 100, 118, 126, 131, 139, 163, 166, 174, 175, 191, 192, 196, 197
Reziliencia, 223, 251
Riziko, 8, 32, 47, 53
Riziko vzniku požiaru, 9, 14, 35, 40, 49, 52, 53, 54, 60, 140, 218, 262

Rozhodovanie, 241, 245
Scenárový postup, 247
Správanie požiaru, 11, 13
Štruktúra lesného paliva, 18
Validácia, 228, 229, 233
Vertikálna kontinuita, 20, 35, 134
Vlhkosť paliva, 40, 41, 47, 104, 132, 169
Výška korunovej bázy, 26, 36, 48, 54, 66, 72, 82, 102, 135, 145, 167, 193, 197
Zápoj, 14, 17, 26, 35, 51, 73, 185, 186, 195, 202, 261
Zraniteľnosť, 222, 251
Živé a odumreté palivo, 16, 28, 32
Živé palivo, 15, 28, 29, 31, 43, 49, 79



ISBN 978-80-228-3543-5