

Sadržaj vlage goriva kod proračuna FirEUrisk požarnog rizika



2025.

FIREURISK – RAZVOJ HOLISTIČKE STRATEGIJE ZA UPRAVLJANJE POŽARNIM RIZICIMA

Broj ugovora: 101003890	
Identifikator poziva: H2020-LC-CLA-2018-2019-2020	
Tema:	LC-CLA-15-2020 Smanjenje rizika od požara raslinja: korak prema pristupu integriranog upravljanja požarima raslinja u EU
Instrument:	RIA

Sadržaj vlage goriva kod proračuna FirEUrisk požarnog rizika

Identifikator dokumenta:	Diseminacija rezultata projekta FirEUrisk za području Republike Hrvatske.
Rok za izradu dokumenta:	31/03/2025
Datum izrade dokumenta:	15/01/2025
Verzija:	1.0
Glavni dokument:	D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modelling process
Autor glavnog dokumenta i glavni partner ovih istraživanja:	Fermín Alcasena, Elena Aragoneses, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia
Prijevod, obrada karata i prilagodba za Hrvatsku:	Darko Stipaničev, Marin Bugarić, Damir Krstinić, Ljiljana Šerić, Maja Braović Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split, Hrvatska
Radni paket:	WP1 - Procjena rizika od požara radi poboljšanja zaštite
Zadatak:	Zadatak 1.1: Procjena rizika od požara Aktivnost A1.1.1. Požarni vremenski uvjeti i stanje goriva
Razina širenja:	<input checked="" type="checkbox"/> PU: Javno <input type="checkbox"/> CO: Povjerljivo, samo za članove Konzorcija (uključujući Službe Komisije)



FIREURISK - DEVELOPING A HOLISTIC, RISK-WISE STRATEGY FOR EUROPEAN WILDFIRE MANAGEMENT

Grant Agreement Number: 101003890	
Call identifier: H2020-LC-CLA-2018-2019-2020	
Topic:	LC-CLA-15-2020 Forest Fires risk reduction: towards an integrated fire management approach in the E.U.
Instrument:	RIA

Fuel moisture content in the calculation of FirEURisk wildfire risk

Deliverable Identifier:	FirEURisk dissemination documents for the territory of the Republic of Croatia
Deliverable Due Date:	31/03/2025
Deliverable Submission Date:	15/01/2025
Deliverable Version:	1.0
Main Document:	D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modelling process
Author of Main Deliverable and Lead Partner of this work:	Fermín Alcasena, Elena Aragoneses, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia
Translation, Map preparation and Adaptation for Croatia:	Darko Stipaničev, Marin Bugarić, Damir Krstinić, Ljiljana Šerić, Maja Braović Faculty of Electrical Engineering, Machine Engineering and Naval Architecture, University of Split, Split, Croatia
Work Package:	WP1 - Fire risk assessment to improve prevention
Task:	Task 1.1 Fire Danger Assessment A1.1.1 Fire weather and fuel status prevention
Dissemination Level:	<input checked="" type="checkbox"/> PU: Public <input type="checkbox"/> CO: Confidential, only for members of the Consortium (including the Commission Services)



Odricanje od odgovornosti

Sadržaj ove publikacije isključiva je odgovornost izdavača i ne predstavlja nužno stavove Europske komisije ili njenih službi. Iako se informacije sadržane u dokumentima smatraju točnima, autori ili bilo koji drugi sudionik FirEUrisk konzorcija ne daju nikakva jamstva u vezi s ovim materijalom, uključujući, ali ne ograničavajući se na implicirana jamstva prikladnosti za određenu svrhu. Ni FirEUrisk konzorcij, niti bilo koji od njegovih članova, službenika, zaposlenika ili agenata neće biti odgovorni za nemar ili bilo kojeg drugog razloga zbog bilo kakve netočnosti ili propusta u ovom dokumentu. Bez umanjivanja općenitosti prethodno navedenog, ni FirEUrisk konzorcij niti bilo koji od njegovih članova, službenika, zaposlenika ili agenata neće biti odgovorni za bilo kakve izravne ili neizravne ili posljedične gubitke ili štete uzrokovane ili proizašle iz bilo koje informacije, savjeta ili netočnosti ili propusta u ovom dokumentu.

Copyright poruka

© FirEUrisk konzorcij, 2021.-2025. Ovaj tekst sadrži originalni neobjavljeni rad, osim gdje je to jasno navedeno. Priznanje prethodno objavljenim materijalima i rada drugih napravljeno je putem odgovarajućeg citiranja, navođenja ili oboje.

Reprodukcija i korištenje svih materijala je dopušteno uz navođenje izvora:

*Stipaničev, D., Bugarić, M., Krstinić, D., Šerić, Lj., Braović, M.: **Vlažnost goriva kod proračuna FirEUrisk požarnog rizika**, FirEUrisk Dissemination Report, 2024. - <https://cipop.fesb.hr/index.php/fireurisk/vlaznost-goriva-kod-proracuna-fireurisk-pozarnog-rizika>*



Sažetak

Ovaj dokument je nastao na temelju istraživanja provedenih u Radnom paketu 1 projekta FirEURisk Zadatku 1.1. posvećenom procjeni rizika od požara, aktivnosti 1.1.1. **Fire weather and fuel status prevention** koja se bavila analizom vremenskih uvjeta i stanja goriva. Konačni rezultati istraživanja objavljeni su u FirEURisk izvještaju:

(Alcasena et al, 2023.) Fermín Alcasena, Elena Aragoneses, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia, (2023.) **D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modelling process**, FirEURisk Report, 2023.

U okviru ovih istraživanja partneri iz **Technische Universität Dresden (TUD)**, Njemačka i **Sapienza Università di Roma**, Italija bili su zaduženi za proračun sadržaja vlage živog goriva, a partneri iz **Meteogrid SL**, Španjolska za proračun sadržaja vlage mrtvog goriva.

Paralelno s tim aktivnostima istraživači s FESB-a koji je bio zadužen za proračun propagacijskog potencijala požara proveli su istraživanje na razini našeg demonstracijskog područja (Splitsko-dalmatinske županije) kako bi potvrdili najpovoljniji način određivanja sadržaja vlage mrtvog goriva kod proračuna propagacijskog potencijala požara. Rezultati su objavljeni u radu:

(Stipaničev & Bugarić, 2023.) Stipaničev, D., Bugarić, M., (2023.) *Dead Fuel Moisture Content in Wildfire Propagation Potential Estimation for Split-Dalmatia County, 2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split/Bol, Croatia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.23919/SpliTech58164.2023.10192943.

a dio materijala je prenesen iz rada istraživača sa FESB-a u okviru projekta IPA Adriatic Holistic:

(Stipaničev & Bugarić, 2015.) Stipaničev, D., Bugarić, M., (2015.) *Fuel Moisture Content (FMC) determination and measurement*, IPA Adriatic Holistic WP5-4 Del 6-1, 2015. i iz rada:

(Stipaničev et al., 2022.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Bakšić, N., Bakšić, D., (2022.) *Fuel Moisture Content in Croatian wildfire spread simulator AdriaFirePropagator*, *Advances in Forest Fire Research 2022*, Domingos Xavier Viegas, Luís Mário Ribeiro (ur.). Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2022. str. 216-221 doi:10.14195/978-989-26-2298-9_35

Izvještaj se u dijelu posvećenom sadržaju vlage živog goriva oslanja na doprinose Technische Universität Dresden objavljenog u izvještaju (Alcasena et al, 2023.) i doprinose Sapienza Università di Roma, Italija (Pampanoni, 2023.), a u dijelu posvećenom sadržaju vlage mrtvog goriva istraživanjima sa FESB-a objavljenim u radu (Stipaničev & Bugarić., 2015., 2023.).

Izvještaj je posvećen postupcima proračuna sadržaja vlage mrtvog goriva i to svih gorivih kategorija (1h, 10h, 100h) na temelju meteoroloških podataka, te postupcima estimacije sadržaja vlage živog goriva (zeljastog, drvenastog i goriva u krošnjama) na temelju analize satelitskih slika, ali i nekim drugim jednostavnijim postupcima pomoću kojih je moguće dobiti karte s prostornom raspodjelom podataka o sadržaju vlage goriva.

Sadržaji vlage su dinamički podaci koji se stalno mijenjaju, pa je za procjenu rizika od požara i simulaciju širenja požara nužno kontinuirano procijeniti njihove vrijednosti. Nadamo se da će ovaj diseminacijski izvještaj projekta FirEURisk potaknuti pokretanje servisa koje bi ove veličine, važne za protupožarnu zaštitu, određivao kontinuirano na dnevnoj osnovi.

Abstract

This document is based on research conducted within Work Package 1 of the FirEURisk project, Task 1.1, dedicated to wildfire risk assessment, specifically Activity 1.1.1: Fire weather and fuel status prevention, which focused on analyzing fire weather conditions and fuel status. The final research results were published in the FirEURisk report:

(Alcasena et al., 2023) Fermín Alcasena, Elena Aragoneses, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia, (2023). **D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modeling process**, *FirEURisk Report*, 2023.

As part of this research, partners from **Technische Universität Dresden** (TUD), Germany and **Sapienza Università di Roma**, Italy were responsible for calculating live fuel moisture content, while partners from **Meteogrid SL**, Spain, were responsible for calculating dead fuel moisture content.

In parallel with these activities, researchers from FESB, responsible for the calculation of wildfire propagation potential, conducted research at the level of the demonstration area (Split-Dalmatia County) to identify the most suitable method for determining dead fuel moisture content in wildfire propagation potential estimation. The results were published in the following study:

(Stipaničev & Bugarić, 2023) Stipaničev, D., Bugarić, M., **Dead Fuel Moisture Content in Wildfire Propagation Potential Estimation for Split-Dalmatia County**, *2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Split/Bol, Croatia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.23919/SpliTech58164.2023.10192943*.

Part of the material was sourced from the work of researchers from FESB within the IPA Adriatic Holistic project:

(Stipaničev & Bugarić, 2015.) Stipaničev, D., Bugarić, M., (2015.) Fuel Moisture Content (FMC) determination and measurement, IPA Adriatic Holistic WP5-4 Del 6-1, 2015. and from paper:

(Stipaničev et al., 2022.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Bakšić, N., Bakšić, D., (2022.) Fuel Moisture Content in Croatian wildfire spread simulator AdriaFirePropagator, *Advances in Forest Fire Research 2022*, Domingos Xavier Viegas, Luís Mário Ribeiro (ur.). Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2022. str. 216-221 doi:10.14195/978-989-26-2298-9_35

This report relies, in the section dedicated to live fuel moisture content, on the contributions of Technische Universität Dresden published in the report (Alcasena et al., 2023) and Sapienza Università di Roma, Italy (Alcasena et al, 2023.) and in the section dedicated to dead fuel moisture content, on the research conducted at FESB published in the study (Stipaničev & Bugarić, 2015., 2023).

The report focuses on the procedures for calculating dead fuel moisture content across all fuel categories (1h, 10h, 100h) based on meteorological data, as well as the methods for estimating live fuel moisture content (herbaceous, woody, crown) using satellite image analysis and other simpler methods.

Fuel moisture content is dynamic and changes constantly, so it is essential to continuously estimate its values for wildfire risk assessment and fire spread simulations. We hope this dissemination report from the FirEURisk project will inspire the establishment of services capable of determining these critical variables, which are essential for wildfire prevention, on a continuous daily basis.

Sadržaj

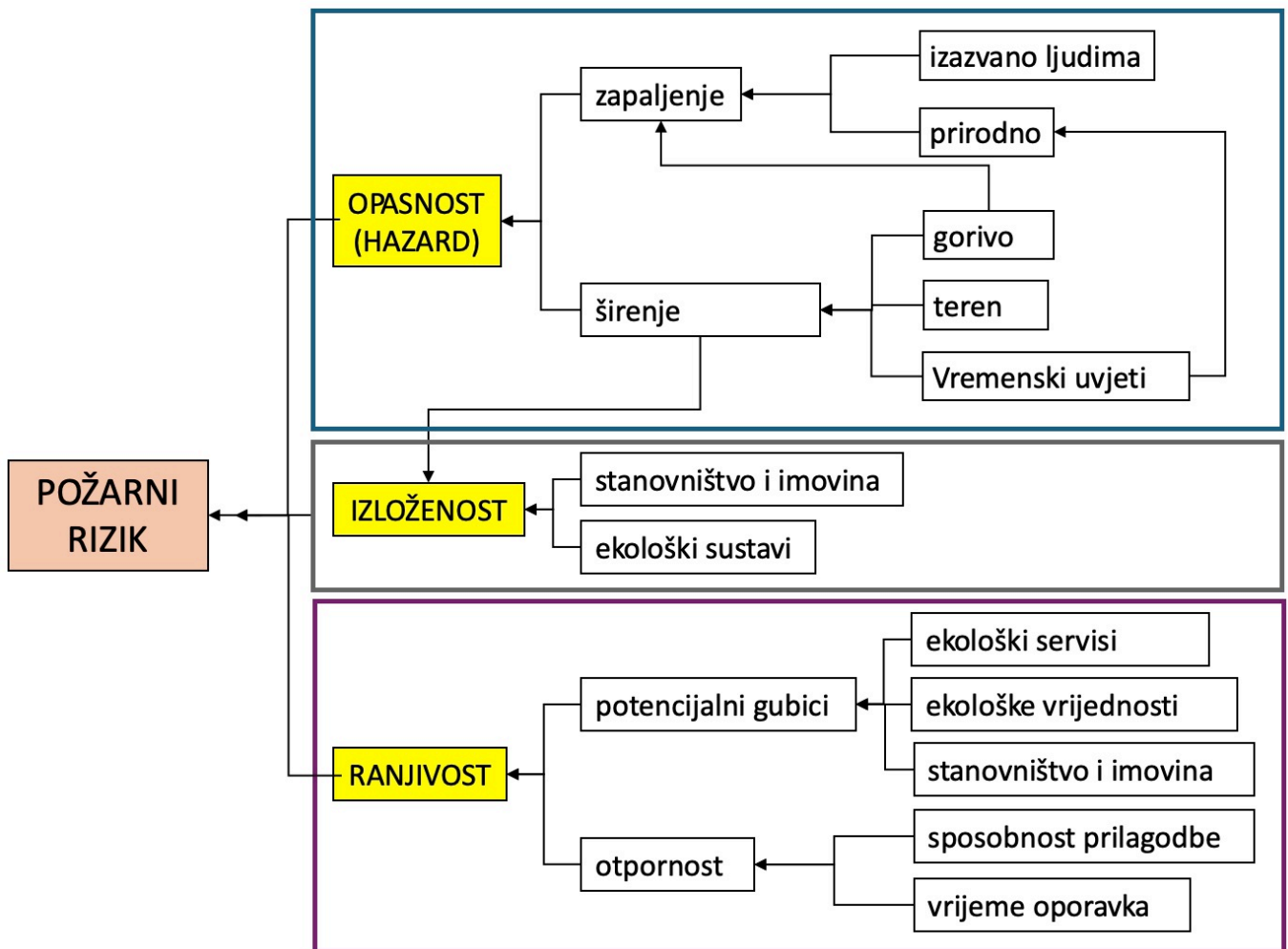
1. Uvod.....	1
2. Utjecaj sadržaja vlage goriva na širenje požara	4
3. Modeli za određivanje sadržaja vlage mrtvog goriva (DFMC).....	5
3.1. Određivanje sadržaja vlage 1-h, 10-h i 100-h mrtvog goriva prema Fosbergovom i Deemingovom modelu integriranom u tablice za analizu ponašanja požara (FBA tablice)	6
3.3. Određivanje sadržaja vlage 1-h i 10-h mrtvog goriva iz ravnotežnog stanja vlage i Cohen & Deeming modela	9
3.3. Određivanje sadržaja vlage 1-h i 10-h mrtvog goriva iz ravnotežnog stanja vlage i Nelsonovog modela.....	11
3.4. Određivanje sadržaja vlage 1-h, 10-h i 100h mrtvog goriva iz kanadskog koda za vlagu finog goriva (FFMC)	13
3.5. Određivanje sadržaja vlage 10-h mrtvog goriva na temelju deficita vodene pare (VPD)....	15
3.6. Usporedba različitih modela za proračun sadržaja vlage mrtvog goriva za različite temperature i vrijednosti relativne vlažnosti zraka	15
3.7. Usporedba različitih modela za proračun sadržaja vlage mrtvog goriva za povijesne požare u Splitsko – dalmatinskoj županiji	19
3.8. Zaključak vezan uz određivanje sadržaja vlage mrtvog goriva (DFMC) na temelju meteoroloških parametara.....	23
4. Modeli za određivanje sadržaja vlage živog goriva (LFMC).....	26
4.1. Određivanje sadržaja vlage živih goriva temeljeno na scenarijima vlažnosti	26
4.2. Određivanje sadržaja vlage živih goriva temeljeno na meteorološkim podacima	27
4.2.1. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju pokazatelj vlažnosti krupnog goriva (DC)	27
4.2.2. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju indeksa vegetacijske sezone.....	27
4.3. Određivanje sadržaja vlage živih goriva temeljeno na satelitskim daljinskim istraživanjima	30
4.3.1. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju optičke dubine vegetacije.....	30
4.3.2. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju satelitskih slika i vidljivog atmosferskog otpornog indeksa	30
4.3.3. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju satelitskih slika i modela prijenosa zračenja	31
4.3.3. Sadržaja vlage živih goriva za FirEUrisk demonstracijsko područje DA20 (Splitsko-dalmatinska županija) na temelju satelitskih slika i modela prijenosa zračenja za 2024.g.	39
4.4. Zaključak vezan uz određivanje sadržaja vlage živog goriva (LFMC)	43
Zaključak	44
7. Literatura	46

1. Uvod

Tri su osnovna faktora koja utječu i na širenje požara, a djelomično i na mogućnost izbijanja požara raslinja i posljedice koje požar može uzrokovati (Countryman, 1972.):

- meteorološki uvjeti (engl. *Weather*)
- karakteristike terena (engl. *Topography*) i
- karakteristike goriva (vegetacije) (engl. *Fuel*).

Meteorološki uvjeti su važni prije svega za širenje požara kao što temeljna shema FirEUrisk projekta prikazuje na Slici 1.



Slika 1. Proračun požarnog rizika u okviru projekta FirEUrisk

Od meteoroloških uvjeta na širenje požara utječu:

- smjer i brzina vjetra koja direktno utječe na širenje požara
- temperatura, relativna vlažnost i naoblaka koji utječu na sadržaj vlage goriva koja je jedan od najvažnijih ulaznih varijabli kod simulacije mogućeg širenja požara.

Sadržaj vlage goriva (engl. FMC – *Fuel Moisture Content*) odnosi se na masu vode sadržane u vegetaciji u odnosu na suhu masu. Njegova važnost jasno je naglašena u radu (Yebara et al., 2013) u kojem se naglašava da je sadržaj vlage: „ ... ključna varijabla koja utječe na interakcije požara s gorivom. Sadržaj vlage u gorivu je jedna od primarnih varijabli u gotovo svim modelima za predviđanje ponašanja požara i simulaciju, kao i u indeksima rizika od požara, jer utječe na zapaljivost, izgaranje, količinu raspoloživog goriva, ozbiljnost i širenje požara te stvaranje i sastav dima.”

Tri su glavna faktora koji ovise o gorivoj sposobnosti vegetacije:

- **Zapaljivost** (engl. *Ignitability*) – vrijeme kašnjenja između izlaganja goriva toplini i početka izgaranja.
- **Održivost** (engl. *Sustainability*) – sposobnost goriva i požara da nastave gorjeti.
- **Izgaranje** (engl. *Combustibility*) – brzina izgaranja.

Sadržaj vlage vegetacije utječe na sve ove faktore. Stoga je za točne simulacije širenja požara ili procjenu rizika od požara sadržaj vlage goriva jedna od najvažnijih ulaznih varijabli. U sljedećim ćemo poglavljima jasno pokazati utjecaj sadržaja vlage goriva na simulaciju širenja požara, a zatim ćemo pružiti smjernice za određivanje i mjerenje sadržaja vlage goriva.

Na početku je važno naglasiti da postoje tri mjere povezane sa sadržajem vlage goriva:

- **Sadržaj vlage goriva** (engl. FMC – *Fuel Moisture Content*),
- **Postotak vlage u živom gorivu** (engl. TH - *Humidity Percentage in Live Fuel*) i
- **Indeks suše** (engl. IS - *Drought Index*).

Ulazni parametri su isti:

- FW – težina uzorka goriva (engl. *Fuel Weight*) i
- DW – težina uzorka goriva nakon sušenja (engl. *Dried Weight*).

a pojedine mjere se računaju izrazima:

$$FMC = ((FW - DW)/DW) * 100\% \quad (1)$$

$$TH = ((FW - DW)/FW) * 100\% \quad (2)$$

$$IS = 200 * (DW/FW) - 100 \quad (3)$$

Indeks suše (IS) je teorijska mjera koja se kreće od -100 do 100. Što je viša vrijednost, to je manja količina vlage u gorivu. Za gorivo bez vlage (hipotetska pretpostavka), težina svježeg i suhog uzorka bit će jednaka, pa indeks suše iznosi 100. Za gorivo potpuno natopljeno vodom (hipotetska pretpostavka), težina suhog uzorka je 0, a indeks suše je -100. Indeks suše iznosi 0 kada je težina živog uzorka dvostruko veća od težine suhog uzorka.

Za simulaciju širenja požara sadržaj vlage goriva (FMC) je najvažnija mjera. Stoga ćemo se u ovom diseminacijskom izvještaju baviti isključivo ovom varijablom. Prema Scottu (Scott, 2012.), FMC je omjer između izvora topline i gubitka topline. Masa vlage predstavlja gubitak topline – toplinu potrebnu za isparavanje te vlage – dok masa suhog goriva predstavlja izvor topline raspoloživ za izgaranje. Scott također ističe: „Sadržaj vlage obično se mjeri u odnosu na suho stanje, a budući da živi gorivi elementi mogu sadržavati više vlage od mase suhog goriva, sadržaj vlage u živim gorivima može premašiti 100 posto. Na primjer, svježe proljetno lišće može imati sadržaj vlage goriva od gotovo 300 posto. To jednostavno znači da na svaki gram suhog lišća dolaze 3 grama vode unutar listova. Omjer izvora topline i gubitka topline je vrlo visok.”

Živo i mrtvo gorivo prirodno se pojavljuju u mješavini u mnogim šumskim gorivima, a svaka komponenta ima svoj obrazac varijacija. Utjecaj sadržaja vlage mrtvog goriva na požar je intenzivno proučavan, ali još uvijek se nedovoljno zna o utjecaju sadržaja vlage živog goriva, a još manje o utjecaju mješavine živog i mrtvog goriva. Žive biljke mogu ili suprimirati izgaranje ili doprinijeti njemu, ovisno o njihovom sadržaju vlage i zapaljivosti kemijskih spojeva prisutnih u biljci.

Standardni modeli ponašanja požara obično kao ulazne podatke koriste:

- **sadržaj vlage mrtvog goriva** (engl. *DFMC – Dead Fuel Moisture Content*)
- **sadržaj vlage živog goriva** (engl. *LFMC – Live Fuel Moisture Content*).

U mnogim modelima rizika od požara, DFMC se najčešće empirijski određuje na temelju vremenskih varijabli, promjera materijala i biokemijskog sastava. LFMC je mnogo teže procijeniti na temelju meteoroloških indeksa u usporedbi s DFMC-om, jer žive biljke imaju različite strategije prilagodbe suši i mogu crpiti vlagu iz zaliha vode u tlu.

Vrijednosti sadržaja vlage mrtvog goriva (DFMC) obično su dodijeljene različitim klasama veličine čestica goriva, koje se označavaju njihovom aproksimativnom vremenskom zadržkom: 1h, 10h, 100h i 1000h. **Vremenska zadržka** (engl. *Time-lag*) je duljina vremena potrebna da čestica goriva pređe iz trenutnog sadržaja vlage u stanje **ravnotežnog sadržaja vlage** (engl. *EMC- Equilibrium Moisture Content*). EMC je sadržaj vlage pri kojem gorivo više niti dobiva niti gubi vlagu. To je dinamička varijabla koja se mijenja s relativnom vlagom i temperaturom, imajući složen odnos. Korelacija između vremenske zadržke i klase veličine čestica goriva prikazana je u Tablici 1.

Tablica 1. Odnos između vremenske zadržke i veličine čestica goriva (Scott, 2012.)

vremenska zadržka	veličina čestica (dijametar) [mm]
1-h	0 - 6
10-h	6 - 25
100-h	25- 75
1000-h	> 75

Tijekom jedne vremenske zadržke sadržaj vlage smanjuje se za 63,2% od trenutnog sadržaja vlage prema ravnotežnom sadržaju vlage (vremenska konstanta sustava prvog reda). Vremenske zadržke od 1 sat i 10 sati odgovaraju finom gorivu, dok vremenske zadržke od 100 sati i 1000 sati odgovaraju krupnom gorivu. U većini modela ponašanja požara klase veličine čestica goriva označene su vremenskim zadržkama, a ne klasom veličine, stvarnom veličinom ili klasifikacijom kao fino ili krupno gorivo.

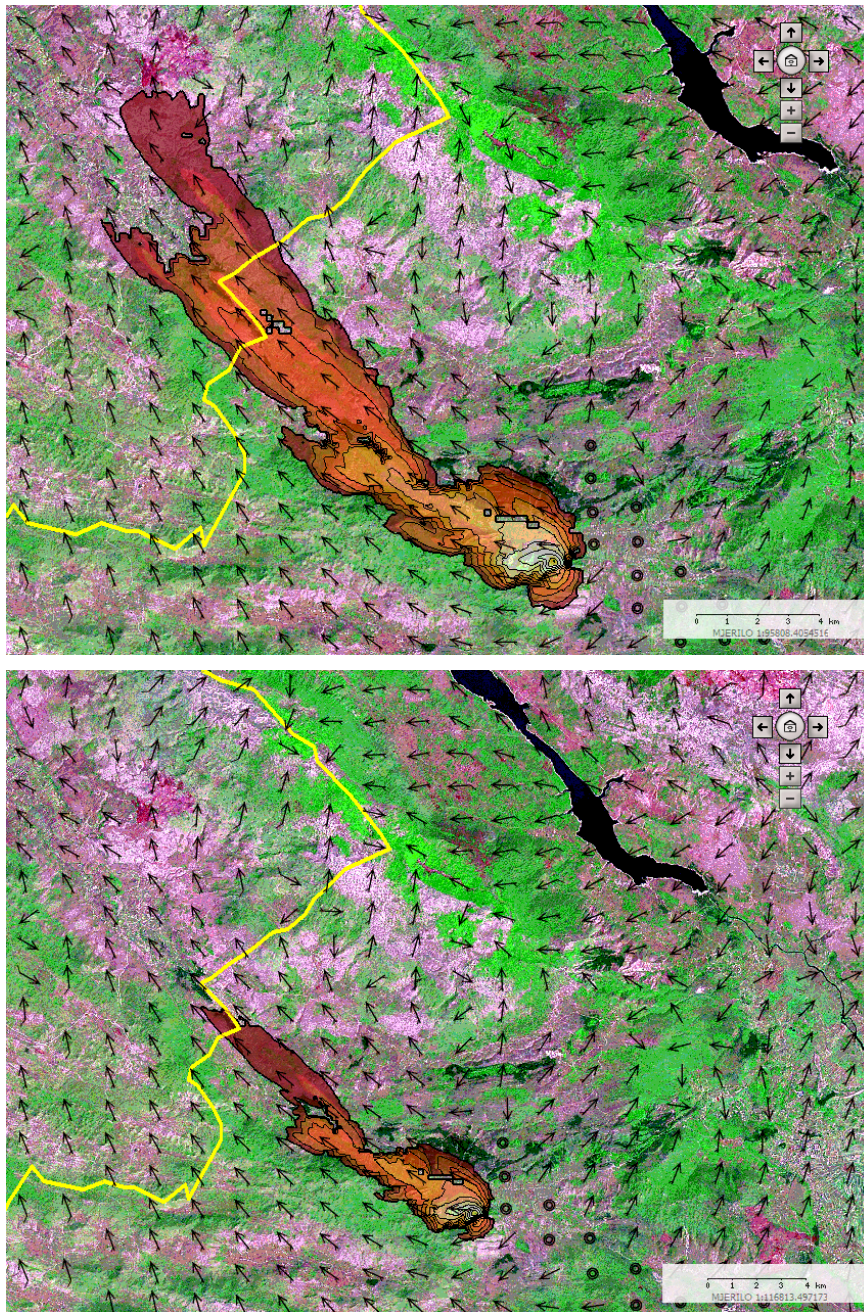
Kod živog goriva, koje je karakterizirano sadržajem vlage živog goriva (LFMC), posebno je važan sadržaj vlage sitnog živog goriva (engl. *LFFMC – Live Fine Fuel Moisture Content*). To je sadržaj vlage lišća i sitnih grančica. Prema (Viegas et al., 2001.): „*Kod živog goriva, sadržaj vlage lišća i sitnih grančica, odnosno sadržaj vlage sitnog živog goriva (LFFMC), reguliran je relativnim brzinama unosa vode kroz korijenje i gubitka vode transpiracijom. Budući da su obje stope kontrolirane višestrukim fizičkim i biološkim varijablama, procjena sadržaja vlage živog goriva mnogo je složenija od procjene sadržaja vlage mrtvog goriva. U praksi se sadržaj vlage mora fizički izmjeriti. U protivnom, moraju se koristiti vrlo grube aproksimacije sadržaja vlage živog goriva.*“

Sadržaj vlage mrtvog goriva (DFMC) uglavnom je kontroliran vanjskim vremenskim uvjetima, kao što su relativna vlažnost, oborine, temperatura i sunčevo zračenje. S druge strane, sadržaj vlage živog goriva (LFMC) u velikoj je mjeri kontroliran unutarnjim fiziološkim mehanizmima, zbog čega ih je teško predvidjeti isključivo na temelju meteoroloških parametara.

2. Utjecaj sadržaja vlage goriva na širenje požara

Sadržaj vlage goriva, kako živog tako i mrtvog, vrlo je osjetljiv parametar u simulacijama širenja požara. Sadržaj vlage živog goriva definira vlagu u živom gorivu (**Moist_live**), dok se sadržaj vlage mrtvog goriva obično definira kao vlagu mrtvog goriva s vremenskim zadržkom od 1 sat (**Mois_dead_1h**), 10 sati (**Mois_dead_10h**) i 100 sati (**Mois_dead_100h**).

Kako bismo ilustrirali koliko je sadržaj vlage goriva važan u simulacijama požara, Slika 2. prikazuje rezultate simulacije širenja požara u kojoj su svi parametri isti, osim sadržaja vlage živog i mrtvog goriva (Stipaničev et al., 2022.). Razlika je očita.



Slika 2. Simulacija širenja požara za iste ulazne parametre osim sadržaja vlage goriva (Stipaničev et al., 2022.):

gornja slika ($Moist_live = 2$, $Mois_dead_1h = 2$, $Mois_dead_10h = 2$, $Mois_dead_100h = 2$),
donja slika ($Moist_live = 5$, $Mois_dead_1h = 4$, $Mois_dead_10h = 3$, $Mois_dead_100h = 3$)

3. Modeli za određivanje sadržaja vlage mrtvog goriva (DFMC)

Utjecaj meteoroloških parametara na sadržaj vlage mrtvog goriva (DFMC) objašnjava se različitim modelima koji se temelje na tri pristupa:

- empirijski pristup
- pristup temeljen na fizikalnim procesima
- polu-empirijski pristup koji kombinira obje metode.

Empirijski modeli oslanjaju se na empirijske odnose između ulaznih podataka, uglavnom meteoroloških varijabli, i izmjerenog sadržaja vlage mrtvog goriva prikupljenog tijekom terenskih promatranja. Oni su potpuno vođeni podacima, ali imaju dvije slabosti:

- Obično ovise o tipu vegetacije.
- Nedostaje im objašnjenje fizičkih procesa poput razmjene topline i vodene pare.

Modeli temeljen na fizikalnim procesima procjenjuju sadržaj vlage mrtvog goriva simuliranjem procesa koji utječu na sadržaj vode u gorivu. Postoje tri vrste takvih modela:

- Modeli koji se temelje na sloj mrtve organske tvari koji se nalazi na površini tla u šumama ili vegetacijskim područjima (engl. *Bulk Litter Layer Models*)
- Modeli temeljeni na Byramevoj jednadžbi difuzije.
- Cjeloviti modeli temeljeni na procesima.

Polu-empirijski modeli kombiniraju oba pristupa.

U ovom diseminacijskom izvještaju fokusirat ćemo se na nekoliko njih, posebno na one koje je lako koristiti za praktičnu procjenu sadržaja vlage mrtvog goriva (DFMC). Odabrano je pet metoda:

1. Procjena DFMC-a prema **modelu Fosberga i Deeminga** (Fosberg & Deeming, 1971.), definiranom u standardnim tablicama za analizu ponašanja požara (engl. FBA – Fire Behavior Analysis Tables), koje se koriste u **78/88 USA Nacionalnom sustavu za ocjenu opasnosti od požara** (engl. *NFDRS - National Fire Danger Rating System*), kao i u osnovnim **tablicama sadržaja vlage goriva** (engl. *BFMC – Basic Fuel Moisture Content Tables*) prilagođenim za južnu Europu i korištenim od strane MeteoGrid-a za službene procjene sadržaja vlage mrtvog goriva u nekoliko zemalja južne Europe (Alcasena et al., 2023). Ova metoda temelji se na empirijskom modelu.
2. Procjena DFMC-a prema **ravnotežnom sadržaju vlage (EMC) i modelu Cohena i Deeminga** (Cohen & Deeming, 1985.) korištenom u **1985 NFDRS-u**. Ova metoda također se temelji na empirijskom modelu.
3. Procjena DFMC-a prema **ravnotežnom sadržaju vlage (EMC) i modelu Nelsona** (Nelson, 2000.), korištenom u **2016 NFDRS-u**. Ova metoda temelji se na modelima temeljenim na fizikalnim procesima.
4. Procjena DFMC-a prema **kanadskom kodu za vlagu sitnog goriva** (engl. *FFMC – Fine Fuel Moisture Code*) (Van Wagner, 1987.). Ovo je polu-empirijski model.
5. Procjena DFMC-a prema **deficitu vodene pare (D)** (engl. Vapor Pressure Deficit) (Nolan et al., 2016.). Ovo je također polu-empirijski model.

3.1. Određivanje sadržaja vlage 1-h, 10-h i 100-h mrtvog goriva prema Fosbergovom i Deemingovom modelu integriranom u tablice za analizu ponašanja požara (FBA tablice)

Prvi model za određivanje sadržaja vlage mrtvog goriva s vremenskim zadržkom od 1 sat i 10 sati predložili su Fosberg i Deeming 1971. godine (Fosberg & Deeming, 1971.). Godine 1983. ovaj model integriran je u **Tablice za analizu ponašanja požara (FBA tablice)**, koje su objavljene u Rothermelovom vodiču (Rothermel, 1983.) za predviđanje ponašanja požara i **78/88 USA Nacionalni sustav za ocjenu opasnosti od požara (NFDRS)**. U tim tablicama sadržaj vlage mrtvog goriva primarno se procjenjuje pomoću temperature zraka i relativne vlažnosti zraka kao ulaznih varijabli.

Tablice su različite za dnevno i noćno razdoblje, uz dodatne korekcije za:

- godišnje doba
- doba dana
- nadmorsku visinu projekcijske točke u odnosu na meteorološku postaju
- strminu nagiba
- orijentaciju terena
- prisutnost oblaka i/ili krošnje koja zasjenjuje sloj goriva.

Vrijednosti sadržaja vlage iz tablica nisu izravno povezane s određenom klasom veličine vremenskog zadržka, već se odnose na opći pojam „sadržaj vlage mrtvog goriva“. Međutim, može se pretpostaviti da odgovaraju klasama za vremensku zadržku od 1 sata.

Tablice je prilagodilo **Španjolsko Ministarstvo poljoprivrede** 1993. godine. Nazvali su ih **Osnovne tablice sadržaja vlage goriva** (engl. *BFMC - Basic Fuel Moisture Content Tables*) (Alcasena et al., 2023). Ove tablice, prikazane u Tablici 2. se malo se razlikuju od originalnih FBA tablica. Postoje dvije tablice:

1. dnevna tablica (od 8:00 do 20:00 prema solarnom vremenu)
2. noćna tablica (od 20:00 do 8:00 prema solarnom vremenu).

Dnevna tablica gotovo je identična originalnoj FBA tablici. Razlike su samo u graničnim temperaturama između područja. Uz to, za dnevne BFMC tablice postoje dodatne korekcije za:

- Godišnja doba, podijeljena u tri skupine: 1. skupina (V., VI., VII.), 2. skupina (II., III., IV., VIII., IX. X.), 3. skupina (XI., XII., I.).
- Izloženost, koja ovisi o oblačnosti (engl. *Cloud Cover*) i pokrovu krošnji (engl. *Crown Cover*).
- Orijentaciji terena prema osnovne 4 strane svijeta (N- sjever, E – istok, S – jug, W – zapad).
- Oborinama, uzimajući u obzir količinu oborina i koliko je dana prošlo od oborina.

Noćna tablica nema nikakvu dodatnu korekciju.

BFMC tablice su testirane od 1991. – 1995. korištenjem španjolskog sustava za simulaciju širenja požara CARDIN. MeteoGrid koristi ove tablice kao službeni alat za procjenu sadržaja vlage mrtvog goriva u južnoj Europi, a ove tablice su prihvaćene i kao službene tablice za procjenu sadržaja vlage mrtvog goriva u okviru FirEURisk projekta. Naša analiza za područje demonstracijskog područja (Splitsko – dalmatinske županije) pokazala je da je odluka ispravna i da su ove tablice najpogodnije za procjenu propagacijskog potencijala požara.

Tablica 2. BFMC osnovne tablice sadržaja vlage finog 1-h goriva (m1h) izraženu u % suhe mase u peći.

Tablica 2a – dnevno razdoblje (8:00 – 22:00 prema solarnom vremenu)																					
temp (°C)	relativna vlažnost zraka (%)																				
	0 4	5 9	10 14	15 19	20 24	25 29	30 34	35 39	40 44	45 49	50 54	55 59	60 64	65 69	70 74	75 79	80 84	85 89	90 94	95 99	100
< 0	1	2	2	3	4	5	5	6	7	8	8	8	9	9	10	11	12	12	13	13	14
0 - 9	1	2	2	3	4	5	5	6	7	7	7	8	9	9	10	10	11	12	13	13	13
10 - 20	1	2	2	3	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	11	12	12	12	13
21 - 31	1	1	2	2	3	4	5	5	6	7	7	8	8	8	9	10	10	11	12	12	13
32 - 42	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	7	8	8	8	9	10	10	11	12	12	13
> 42	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	7	8	8	8	9	10	10	11	12	12	12

Tablica 2b – noćno razdoblje (22:00 – 8:00 prema solarnom vremenu)																					
temp (°C)	relativna vlažnost zraka (%)																				
	0 4	5 9	10 14	15 19	20 24	25 29	30 34	35 39	40 44	45 49	50 54	55 59	60 64	65 69	70 74	75 79	80 84	85 89	90 94	95 99	100
0 - 9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	11	11	12	13	14	16	18	21	24	25+	25+
10 - 20	1	2	3	4	5	6	6	8	8	9	10	11	11	12	14	16	17	20	23	25+	25+
21 - 31	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	10	11	12	13	15	17	20	23	25+	25+
32 - 42	1	2	3	3	4	5	6	7	8	9	9	10	10	11	13	14	16	19	22	25	25+
> 42	1	2	3	3	4	5	6	6	9	9	9	9	10	11	12	14	16	19	21	24	25+

Tablica 3. Korektivni faktori za dnevnu tablicu.

korektivni faktor koji treba dodati na vrijednosti iz osnovne tablice za dnevno razdoblje (8:00 – 22:00 prema solarnom vremenu) i mjesece (V., VI., VII.)								
orijentacija	nagib	doba dana - izloženost - manje od 50% goriva u sjeni						
		08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
N sjever	0-30%	3	1	0	0	1	3	
	>30%	4	2	1	1	2	4	
E istok	0-30%	2	1	0	0	1	4	
	>30%	2	0	0	1	3	5	
S jug	0-30%	3	1	0	0	1	3	
	>30%	3	1	1	1	1	3	
W zapad	0-30%	3	1	0	0	1	3	
	>30%	5	3	1	0	0	2	
izloženost – više od 50% goriva u hladu zbog sjene krošnji ili oblaka								
N - sjever	0% +	5	4	3	3	4	5	
E - istok	0% +	4	4	3	4	4	5	
S - jug	0% +	4	4	3	3	4	5	
W - zapad	0% +	5	4	3	3	4	4	

ravni teren bez nagiba = izloženost prema jugu (S)								
korektivni factor koji treba dodati na vrijednosti iz osnovne tablice za dnevno razdoblje (8:00 – 22:00 prema solarnom vremenu) i mjesece (II., III., IV., VIII., IX., X.)								
orijentacija	nagib	doba dana - izloženost - manje od 50% goriva u sjeni						
		08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
N sjever	0-30%	4	2	1	1	2	4	
	>30%	4	3	3	3	3	4	
E istok	0-30%	4	2	1	1	2	4	
	>30%	3	1	1	2	4	5	
S jug	0-30%	4	2	1	1	2	4	
	>30%	4	2	1	1	2	4	
W zapad	0-30%	4	2	1	1	2	4	
	>30%	5	4	2	1	1	3	
izloženost – više od 50% goriva u hladu zbog sjene krošnji ili oblaka								
N - sjever	0% +	5	5	4	4	5	5	
E - istok	0% +	5	4	4	4	5	5	
S - jug	0% +	5	4	4	4	4	5	
W - zapad	0% +	5	5	4	4	4	5	
ravni teren bez nagiba = izloženost prema jugu (S)								

korektivni factor koji treba dodati na vrijednosti iz osnovne tablice za dnevno razdoblje (8:00 – 22:00 prema solarnom vremenu) i mjesece (XI., XII., I.)								
orijentacija	nagib	doba dana - izloženost manje od 50% goriva u sjeni						
		08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
N sjever	0-30%	5	4	3	3	4	5	
	>30%	5	5	5	5	5	5	
E istok	0-30%	5	4	3	3	4	5	
	>30%	5	4	3	2	5	5	
S jug	0-30%	5	4	3	2	4	5	
	>30%	5	3	1	1	3	5	
W zapad	0-30%	5	4	3	3	4	5	
	>30%	5	5	4	2	3	5	
izloženost – više od 50% goriva u hladu zbog sjene krošnji ili oblaka								
sve orijentacije	0% +	5	5	5	5	5	5	
ravni teren bez nagiba = izloženost prema jugu (S)								

Izloženost se određuje uzevši u obzir i pokrov krošnji i oblačnost.

Dodatni korekcijski faktor vezan je s količinom oborina PPT (precipitacijom) i vremenom od zadnjih oborina. Prikazuje ga Tablica 4.

Tablica 4. Korektivni faktori za dnevnu tablicu i količinu oborina (precipitaciju). PPT je količina padalina u mm.

broj dana od zadnjih padalina	PPT < 5mm		PPT 5-15mm		PPT 15-35mm		PPT > 35mm	
	IV. - X.	XI. - III.	IV. - X.	XI. - III.	IV. - X.	XI. - III.	IV. - X.	XI. - III.
1	PPT	PPT	PPT	PPT	PPT	PPT	PPT	PPT
2	PPT	PPT	5	PPT	15	PPT	35	PPT
3	0	PPT	1	PPT	5	PPT	15	35
4	0	PPT	0	PPT	1	15	5	15
5	0	1	0	5	0	5	1	5
6	0	0	0	1	0	1	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0

Za izračun sadržaja vlage srednjeg (10-h) i krupnog (100-h) goriva MeteoGrid (Alcasena et al., 2023) koristi jednostavnu polinomalnu aproksimaciju koji uzima u obzir vrijednost vlage sitnog mrtvog goriva (za izračun 10-h) i srednjeg mrtvog goriva (za izračun 100-h), kao i očekivane promjene relativne vlažnosti i temperature zraka. Ova promjena se uzima u obzir na način da se za svaki dan izračunavaju vrijednosti sadržaja vlage u 6 sati ujutro (s indeksom 06) i 3 sata poslijepodne (s indeksom 15) za obje varijable, primjenjujući interpolaciju između njih, na sljedeći način (u % suhe mase u peći):

$$m10h_{15} = m1h_{15} + (0,4141 * m1h_6 - m1h_{15}) + 0,5 \quad (4)$$

$$m10h_6 = m1h_6 + (0,5571 * m1h_6 - m1h_{15}) + 0,5 \quad (5)$$

Na slični način se izračunava i vlažnost krupnog goriva ($m100h$):

$$m100h_{15} = m10h_{15} + (0,4141 * m10h_6 - m10h_{15}) + 0,5 \quad (6)$$

$$m100h_6 = m10h_6 + (0,5571 * m10h_6 - m10h_{15}) + 0,5 \quad (7)$$

Postoje i drugačiji pristupi estimacije srednjeg i krupnog goriva koje spominjemo u nastavku. Kod nekih se modela temeljno računa sadržaj vlage srednjeg goriva ($m10h$), pa se onda estimira sadržaj vlage finog goriva ($m1h$), o čemu više u nastavku.

Na kraju napomenimo i to da za proračun požarnog rizika, kod kojih je jedan od ulaznih parametara propagacijski potencijal (Slika 1.), uvijek pretpostavlja najgore (ekstremno) stanje, a to je ono za koje je sadržaja vlage goriva najmanji. Svi korekcijski faktori iz Tablica 3. i 4. povećavaju početni sadržaj vlage izračunat iz Tablice 2., pa ih za potrebe proračuna požarnog rizika nije potrebno uključivati.

3.3. Određivanje sadržaja vlage 1-h i 10-h mrtvog goriva iz ravnotežnog stanja vlage i Cohen & Deeming modela

Godine 1985. **Cohen i Deeming** (Cohen & Deeming, 1985.) predložili su jednadžbe za određivanje sadržaj vlage mrtvog goriva s vremenskim zadržkom od 10 sati (10-h DFMC) na temelju ravnotežnog sadržaja vlage (EMC).

Ravnotežni sadržaj vlage (EMC) je sadržaj vlage u gorivu izražen u postocima (%) nakon što gorivo ima dovoljno vremena da postigne ravnotežu s okolinom. Predloženi su različiti modeli za izračun EMC-a, a većina njih kao ulazne parametre koristi temperaturu zraka T ($^{\circ}\text{C}$) i relativnu vlažnost zraka RH (%).

Cohen & Deeming model je empirijski model u kojem se sadržaj vlage mrtvog goriva s vremenskim zadržkom od 1 sat m1h (%) i 10 sati m10h (%) izračunava na temelju 10-satnog ravnotežnog sadržaja vlage EMC10h (%).

Ako je gorivo **suho** (akumulirane oborine u prethodna 24 sata bile su manje od 0,01 m ili ako je dubina snijega manja od 0,001 m ekvivalenta vode):

$$m10h = 1.28 * EMC10h \quad (8)$$

$$m1h = 1.03 * EMC10h = 0.805 * m10h \quad (9)$$

Ako je gorivo **meko** (akumulirane oborine u prethodna 24 sata bile su najmanje 0,01 m ili je dubina snijega bila najmanje 0,001 m ekvivalenta vode):

$$m10h = 35\% \quad m1h = 28\% \quad (10)$$

EMC10h može se lako izračunati pomoću korigirane temperature ($T_{f(SOW)}$) i korigirane relativne vlažnosti zraka ($RH_{f(SOW)}$):

Ako je $RH < 10\%$:

$$EMC10h = 0.03229 + 0.281073 * RH_{f(SOW)} - 0.000578 * T_{f(SOW)} * RH_{f(SOW)} \quad (11)$$

Ako je $10\% \leq RH \leq 50\%$:

$$EMC10h = 2.22749 + 0.160107 * RH_{f(SOW)} - 0.014784 * T_{f(SOW)} \quad (12)$$

Ako je $RH \geq 50\%$:

$$EMC10h = 21.0606 + 0.005565 * RH^2_{f(SOW)} - 0.00035 * RH_{f(SOW)} * T_{f(SOW)} - 0.483199 * RH_{f(SOW)} \quad (13)$$

Indeks f(SOW) označava da su primijenjene dodatne korekcije temperature T i relativne vlažnosti RH kako bi se njihovi izračuni bolje prilagodili kontaktu s elementima goriva. Korekcije ovise o **kodu stanja vremena** (engl. SOW – State-of-weather), koji je procjena intenziteta insolacije i grubo se procjenjuje prema oblačnosti (CC) i postojanju oborina (PPT).

Ako je gorivo suho (nema oborina), primjenjuje se korekcija temperature $T_{f(SOW)} = T + T_{corr}$ i relativne vlažnosti $RH_{f(SOW)} = RH * RH_{corr}$ prema Tablici 5.

Tablica 5. Korekcije temperature i relativne vlažnosti prema kodovima stanja vremena (SOW) definiranim prema oblačnosti (CC) kada je gorivo suho (Cohen & Deeming, 1985.).

SOW	opis	CC (%)	T_{corr}	RH_{corr}
0	čisto nebo	$CC \leq 10\%$	+25°F (ili +13.89°C)	* 0.75
1	raspršeni oblaci	$10\% < CC \leq 50\%$	+19°F (ili +10.56°C)	* 0.83
2	djelomično oblačno	$50\% < CC \leq 90\%$	+12°F (ili +6.67°C)	* 0.92
3	potpuno oblačno	$CC > 90\%$	+5°F (ili +2.78°C)	* 1.00

Ako relativna vlažnost nije dostupna, može se izračunati u % iz temperature (T) i temperature točke rosišta (T_D) (obje u °C) pomoću formula koje su predložio (Lewrance, 2005.)

$$RH = 100 \cdot \left[\frac{e^{\frac{17.625 \cdot T_D}{243.04 + T_D}}}{e^{\frac{17.625 \cdot T}{243.04 + T}}} \right] \quad (14)$$

a može se koristiti i formula koju je predložio (Wanielista et al., 1997):

$$RH = 100 \cdot \left[\frac{112 - 0,1 \cdot T + T_D}{112 + 0,9 \cdot T} \right]^8 \quad (15)$$

Ovaj model korišten je u **1985 USA Nacionalnom sustavu za ocjenu opasnosti od požara (NFDRS)** Također su ga koristili (Pettinary & Chuvieco, 2017.) za simulaciju ponašanja požara na temelju globalnog skupa podataka o gorivu, te klimatskih i topografskih informacija.

Cohen & Deeming model ne nudi postupak za određivanje sadržaja vlage krupnog goriva (m100h). Postupak predložen od, opisan u prethodnom poglavlju, je previše zahtjevan zato što traži određivanje m10h u dva vremenska termina. Jednostavniji postupak su predložili Scott i Burgan (Scott & Burgan, 2005.) koji se temelji na **scenarijima vlažnosti goriva** (engl. *Fuel Moisture Scenarios*). Predložili su 4 scenarija za mrtvo gorivo prikazanih u Tablici 6.

Tablica 6. Scenariji sadržaja vlage u gorivu (%) prema (Scott & Burgan, 2005.) i (Pettinary & Chuvieco, 2017.) za sadržaj vlage u krošnjama.

mrtvo gorivo	D1 - vrlo mali	D2 - mali	D3 - umjereni	D4 - veliki
1-h	3	4	5	6
10-h	4	5	6	7
100-h	5	6	7	8

Postupak računanja je krajnje jednostavan. Srednje gorivo (m10h) ima za 1% veću vrijednost of finog goriva (m1h), a krupno gorivo (d100h) za 1% veću vrijednost od srednjeg (d10h). Prema tome dovoljno je odrediti jednu vrijednost, na primjer d10h, pa iz nje izračunati

$$d1h = d10h - 1 \quad (16)$$

$$d100h = d10h + 1 \quad (17)$$

Za usporedbu, originalna C&D formula (9) bi dala za $d10h = 4 \rightarrow d1h = 3,22$, za $d10h = 5 \rightarrow d1h = 3,025$, za $d10h = 6 \rightarrow d1h = 4,83$ i za $d10h = 7 \rightarrow d1h = 5,635$.

3.3. Određivanje sadržaja vlage 1-h i 10-h mrtvog goriva iz ravnotežnog stanja vlage i Nelsonovog modela

Nelson je predložio novu metodu za procjenu vlage goriva s vremenskim zadržkom od 10 sati (Nelson, 2000.). Model se temelji na osnovnom termodinamičkom zakonu očuvanja energije:

$$gubitak topline = dobitak topline \quad (18)$$

ili preciznije:

$$provod topline + dugovalno zračenje + isparavanje = solarno grijanje + konvektivno grijanje \quad (19)$$

Nelson je razvio jednadžbe koje opisuju prijenos topline i vlage na površini i unutar štapića goriva s vremenskim zadržkom od 10 sati (duljine 50 cm i promjera 1,27 cm). Model je prilično složen, a jednadžbe se moraju numerički rješavati. Radi se o dinamičkom modelu koji uzima u obzir ne samo vremenske varijable (temperaturu, relativnu vlažnost zraka, solarno zračenje i oborine) već i prethodni sadržaj vlage. Ovaj model korišten je u **2016 USA Nacionalnom sustavu za ocjenu opasnosti od požara (NFDRS)** za procjenu vlage goriva za 1 sat i 10 sati te je implementiran u popularni program za simulaciju ponašanja požara **FlamMap**. U programu **FlamMap**, inicijalizacija kondicioniranja goriva temelji se na vrijednosti vlage m10h, a m1h se estimira iz nje.

Za proračun požarnog rizika, kod kojih je jedan od ulaznih parametara propagacijski potencijal (Slika 1.), nije potreban dinamički model zato što se pretpostavlja najgore (ekstremno) stanje koje ima najmanju vrijednost sadržaja vlage goriva. U tom slučaju može se sadržaj vlage 10-h mrtvog goriva za 10 sati (m10h) procijeniti samo iz ravnotežnog sadržaja vlage za 10 sati (EMC10h):

$$m_{10h} = 1,28 * EMC_{10h} \quad (20)$$

Scott (Scott, 2012.) je predložio jednadžbu za procjenu sadržaja vlage finog goriva (m_{1h}) iz sadržaja vlage srednjeg goriva:

$$m_{1h} = 0,2 * m_{10h} + 0,8 * EMC_{10h} = 1,056 * EMC_{10h} \quad (21)$$

Koeficijent sada iznosi 1,056, što je nešto veća vrijednost nego u Cohen & Deeming modelu opisanom jednadžbom (9).

EMC_{10h} se može izračunati iz površinske temperature štapića T_s ($^{\circ}C$) i površinske relativne vlažnosti štapića RH_s (%):

$$EMC_{10h} = U * [-\ln(1 - RH_s)]^u * 100 \quad (22)$$

gdje su:

$$U = 0,1617 - 0,001419 * T_s \quad (23)$$

$$u = 0,4567 - 0,003578 * T_s \quad (24)$$

Postupak izračuna koji je predložio Nelson (Nelson, 2000.) za površinsku temperaturu štapića T_s i površinsku relativnu vlažnost RH_s iz ambijentalne temperature i vlažnosti zraka prilično je složen. Jolly (Jolly, 2016.) je razvio jednostavnije tablice za izračun temperature štapića T_s na temelju Nelsonovog modela, kalibrirane za jugoistok SAD-a. Ulazne varijable za procjenu površinske temperature štapića bile su temperatura zraka i solarno zračenje, uz pretpostavku da je površinska relativna vlažnost štapića RH_s ista kao relativna vlažnost zraka RH.

Tablicu preračunatu za temperaturu u $^{\circ}C$ i solarno zračenje u W/m^2 prikazuje Tablica 7.

Tablica 7. Proračun površinske temperature štapića iz temperature zraka ($^{\circ}C$) i solarnog zračenja (W/m^2) - preračunato iz (Jolly, 2016.).

temperatura ($^{\circ}C$)	sunčevo zračenje (W/m^2)														
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	> 1300
< -9.44	0.00	1.11	2.22	3.33	4.44	5.56	6.67	7.78	8.89	10.00	11.11	12.22	13.33	14.44	15.56
-9.44	2.78	3.33	4.44	5.56	6.67	7.78	8.89	10.00	11.11	12.22	13.33	14.44	15.56	16.67	17.78
-6.67	5.00	6.11	7.22	8.33	9.44	10.56	11.67	12.78	13.89	15.00	15.56	16.67	17.78	18.89	20.00
-3.89	7.22	8.33	9.44	10.56	11.67	12.78	13.89	15.00	16.11	17.22	18.33	19.44	20.56	21.67	22.78
-1.11	9.44	10.56	11.67	12.78	13.89	15.00	16.11	17.22	18.33	19.44	20.56	21.67	22.78	23.89	25.00
1.67	12.22	13.33	14.44	15.56	16.67	17.78	18.89	20.00	20.56	21.67	22.78	23.89	25.00	26.11	27.22
4.44	14.44	15.56	16.67	17.78	18.89	20.00	21.11	22.22	23.33	24.44	24.44	26.67	27.78	28.89	30.00
7.22	16.67	17.78	18.89	20.00	21.11	22.22	23.33	24.44	25.56	26.67	27.78	28.89	30.00	31.11	32.22
10.00	19.44	20.56	21.67	22.78	23.89	24.44	25.56	26.67	27.78	28.89	30.00	31.11	32.22	33.33	34.44
12.78	21.67	22.78	23.89	25.00	26.11	27.22	28.33	29.44	30.56	31.67	32.78	33.89	35.00	36.11	37.22
15.56	23.89	25.00	26.11	27.22	28.33	29.44	30.56	31.67	32.78	33.89	35.00	36.11	37.22	38.33	39.44
18.33	26.67	27.78	28.89	29.44	30.56	31.67	32.78	33.89	35.00	36.11	37.22	38.33	39.44	40.56	41.67
21.11	28.89	30.00	31.11	32.22	33.33	34.44	35.56	36.67	37.78	38.89	40.00	41.11	42.22	42.78	43.89
23.89	31.11	32.22	33.33	34.44	35.56	36.67	37.78	38.89	40.00	41.11	42.22	43.33	44.44	45.56	46.67
26.67	33.89	34.44	35.56	36.67	37.78	38.89	40.00	41.11	42.22	43.33	44.44	45.56	46.67	47.78	48.89
29.44	36.11	37.22	38.33	39.44	40.56	41.67	42.78	43.89	45.00	46.11	46.67	47.78	48.89	50.00	51.11
32.22	38.33	39.44	40.56	41.67	42.78	43.89	45.00	46.11	47.22	48.33	49.44	50.56	51.67	52.78	53.89
35.00	40.56	41.67	42.78	43.89	45.00	46.11	47.22	48.33	49.44	50.56	51.67	52.78	53.89	55.00	56.11
37.78	43.33	44.44	45.56	46.67	47.78	48.89	50.00	51.11	51.67	52.78	53.89	55.00	56.11	57.22	58.33
40.56	45.56	46.67	47.78	48.89	50.00	51.11	52.22	53.33	54.44	55.56	56.67	57.78	58.89	60.00	61.11
43.33	47.78	48.89	50.00	51.11	52.22	53.33	54.44	55.56	56.67	57.78	58.89	60.00	61.11	62.22	63.33
46.11	50.56	51.67	52.78	53.89	55.00	56.11	56.67	57.78	58.89	60.00	61.11	62.22	63.33	64.44	65.56
48.89	52.78	53.89	55.00	56.11	57.22	58.33	59.44	60.56	61.67	62.78	63.89	65.00	66.11	67.22	68.33
> 48.898	55.00	56.11	57.22	58.33	59.44	60.56	61.67	62.78	63.89	65.00	66.11	67.22	68.33	69.44	70.56

Nelson-Jolly pojednostavljeni model također daje i tablicu za ravnotežni sadržaj vlage (EMC) procijenjen iz površinske temperature štapića T_s ($^{\circ}F$) i relativne vlažnosti zraka RH (%). Problem je što je ovaj EMC povezan s finim gorivima, pa odgovara EMC_{1h} , dok je za Nelsonovu jednadžbu (18) potreban EMC_{10h} . Drugi problem s pojednostavljenim Nelson-Jolly modelom je da je kalibriran za jugoistok SAD-a, a ne za mediteranski teritorij, što je prikladno našem podneblju.

Nelsonov model također ne nudi način proračuna sadržaja vlage krupnog goriva (m_{100h}), pa i ovdje možemo koristiti Scott – Burgan scenarija vlažnosti kod kojih je $d_{100h} = d_{10h} + 1$.

Nelsonov model nije jedini koji se temelji na modeliranju fizičkih procesa za vlagu goriva. U radu (Van der Kamp et al., 2017.) predložen je **model vlage štapića goriva** (engl. *FSMM - Fuel Stick Moisture Model*) za srednja goriva (m10h), temeljen na satnim mjerenjima relativne vlažnosti, temperature zraka, oborina, brzine vjetra, kratkovalnog i dugovalnog zračenja. U usporedbi s Nelsonovim modelom, njihova obrada procesa difuzije vlage, provoda topline, uključivanja oborina i isparavanja je pojednostavljena, dok je obrada prijenosa zračenja još kompleksnija. Prema autorima, ovaj model je bolji od Nelsonovog modela i ima dodatne značajke koje omogućuju realističniji tretman krošnje i promjena na nebu, ali je previše složen za primjenu kod procjene propagacijskog potencijala.

3.4. Određivanje sadržaja vlage 1-h, 10-h i 100h mrtvog goriva iz kanadskog koda za vlagu finog goriva (FFMC)

Sadržaj vlage mrtvog goriva također se može procijeniti pomoću kanadskog koda za vlagu mrtvih finih goriva (engl. *FFMC - Fine Fuel Moisture Content*), koji je dio sustava kanadskog meteorološkog indeksa vatre (engl. *FWI - Fire Weather Index*). FFMC je dinamička numerička vrijednost u rasponu od 0 do 100, izračunata na temelju temperature zraka, relativne vlažnosti, brzine vjetra, oborina u posljednja 24 sata i prethodne vrijednosti FFMC-a.

Kada je FFMC dostupan, sadržaj vlage finog goriva m1h (%), može se lako izračunati pomoću Van Wagnerove formule (Van Wagner, 1987.):

$$m1h = 147,2 * ((101 - FFMC)/(59,5 + FFMC)) \quad (25)$$

Formula vrijedi za cijeli FFMC raspon od 0 do 100.

Viegas (Viegas, 2005.) je također predložio formulu koja povezuje FFMC-a i sadržaj vlage sitnog mrtvog goriva m1h (%):

$$m1h = (9 * 10^9) / FFMC^{4,54} \quad (26)$$

s tim da ova formula vrijedi samo za FFMC \in [65, 95].

Najjednostavniji relacija koji opisuje povezanost između FFMC-a i sadržaja vlage sitnog goriva m1h (%) predložen je u:

$$m1h = 101 - FFMC \quad (27)$$

Ako FFMC nije dostupan, sadržaj vlage goriva za 1 sat, m1h (%), može se procijeniti iz ravnotežnog sadržaja vlage EMC1h (%) koristeći Van Wagnerove jednadžbe (Van Wagner, 1987.). Predložene su dvije jednadžbe za ravnotežni sadržaj vlage, jedna za uvjete bez kiše (EMC1h-d) s višim vrijednostima i druga za uvjete s kišom (EMC1h-w) s nižim vrijednostima. Uvjeti bez kiše ili s kišom određuju se oborinama na otvorenom, izmjerenima jednom dnevno u podne, PPT (mm). Za procjenu propagacijskog potencijala dinamički dio koji odgovara uvjetima sušenja ili vlaženja se može izostaviti.

Ako je PPT ≤ 0.5 mm tada imamo **uvjete bez kiše**:

$$EMC1h-d = 0,942 * RH^{0,679} + 11 * e^{(RH - 100)/10} + 0,18 * (21,1 - T) * (1 - e^{-0,115 * RH}) \quad (28)$$

$$m1h = EMC1h-d \quad (29)$$

Ako je PPT > 0.5 mm tada imamo **kišne uvjete**:

$$EMC1h-w = 0,618 * RH^{0,753} + 10 * e^{(RH - 100)/10} + 0,18 * (21,1 - T) * (1 - e^{-0,115 * RH}) \quad (30)$$

$$m1h = EMC1h-w \quad (31)$$

Sadržaj vlage goriva za 10 sati, m10h (%), jednostavno se procjenjuje iz m1h (%) koristeći Scott & Burgan scenarije vlažnosti (Scott & Burgan, 2005.):

$$m_{10h} = m_{1h} + 1 \text{ (\%)} \quad (32)$$

$$m_{100h} = m_{1h} + 2 \text{ (\%)} \quad (33)$$

Važno je napomenuti da su intenzivna terenska istraživanja Nere Bakšić, tijekom rada na doktorskoj disertaciji (Bakšić et al., 2017.) (Bakšić & Bakšić, 2022.) pokazala da bi jednadžbe za proračun EMC-a trebale biti povezane i s vrstama vegetacije. Koeficijenti u EMC jednadžbama razlikuju se za različite vrste. Autori su izmjerili sadržaj vlage mrtvog goriva dvije važne dalmatinske vrste: *Pinus halepensis* (Mill.) i *Pinus nigra* (Arnold) subsp. *dalmatica* (Vis.) Franco te su na temelju tih mjerenja predloženi novi FFMC modeli, nazvani PhFFMC za *P. halepensis* i PnFFMC za *P. nigra*. Korigirane jednadžbe su:

PhFFMC za *P. halepensis* (Bakšić et al., 2017.):

$$PhEMC_{1h-d} = 1,598 * RH^{0,679} + 12,786 * e^{(RH-100)/10} + 0,18 * (21,1 - T) * (1 - e^{-0,115 \cdot RH}) \quad (34)$$

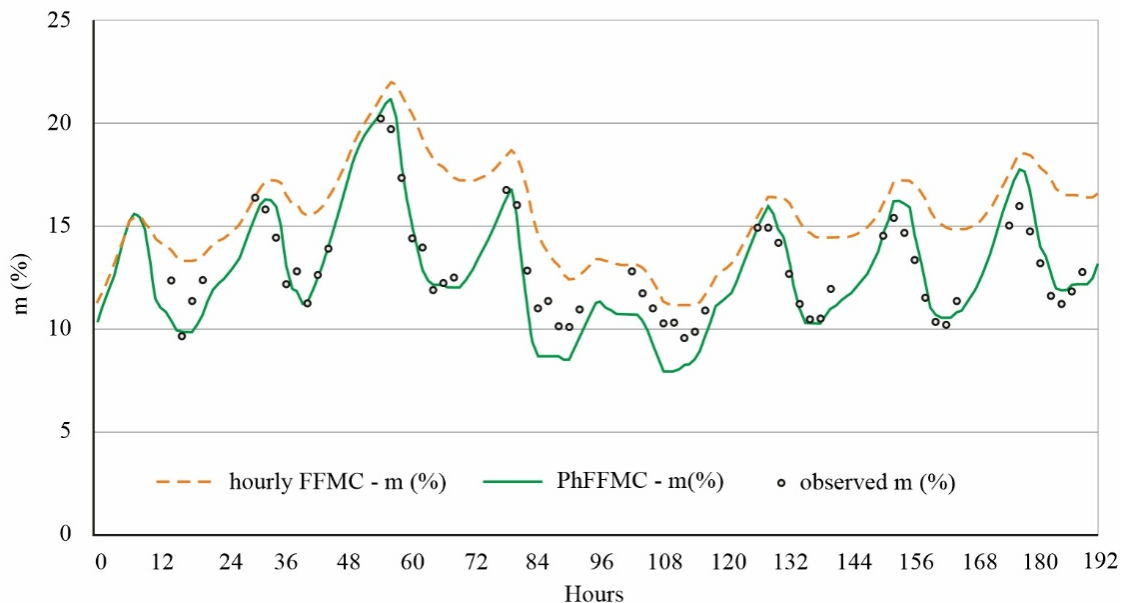
$$PhEMC_{1h-w} = 1,227 * RH^{0,555} + 10 * e^{(RH-100)/10} + 0,18 * (21,1 - T) * (1 - e^{-0,115 \cdot RH}) \quad (35)$$

PnFFMC za *P. nigra* (Bakšić & Bakšić, 2022.):

$$PnEMC_{1h-d} = 0,883 * RH^{0,620} + 8 * e^{(RH-100)/10} + 0,18 * (21,1 - T) * (1 - e^{-0,115 \cdot RH}) \quad (36)$$

$$PnEMC_{1h-w} = 0,722 * RH^{0,635} + 12,197 * e^{(RH-100)/10} + 0,18 * (21,1 - T) * (1 - e^{-0,115 \cdot RH}) \quad (37)$$

Slika 3. zorno prikazuje prednosti Bokšić modelprikazuje usporedbu izmjerenog sadržaja vlage s izračunatim sadržajem vlage korištenjem originalne FFMC jednadžbi i PhFFMC jednadžbi (Bakšić et al., 2017.).



Slika 3. Usporedba izmjerenog sadržaja vlage s izračunatim sadržajem vlage korištenjem originalne FFMC jednadžbi i PhFFMC jednadžbi (Bakšić et al., 2017.).

U radu (Stipaničev et al., 2022) uspoređena je simulacija širenja požara temeljena na Rothermelovom modelu za dobro dokumentirani požar na Lastovu iz 2003. godine koristeći tri modela za procjenu vlage mrtvog goriva: FBA tablice, originalni kanadski FFMC i prilagođeni hrvatski PhFFMC, jer je *P. halepensis* bila dominantna vrsta u vegetaciji Lastova. PhFFMC model pokazao je najbolje podudaranje simuliranog područja širenja požara sa stvarnim područjem širenja požara, dok je originalni FFMC dao najmanje područje (podcijenjeno), a FBA tablice najveće područje (precijenjeno).

3.5. Određivanje sadržaja vlage 10-h mrtvog goriva na temelju deficita vodene pare (VPD)

Posljednji, prilično jednostavan postupak za procjenu sadržaja vlage 10-h mrtvog goriva je metoda koju su predložili (Nolan et al., 2016.). Temelji se na polu-mehaničkom modelu koji su izvorno razvili (Resco de Dios et al., 2015.). Temelji se na eksponencijalnoj vezi između sadržaja vlage i deficita vodene pare (VPD). Predložene su dvije jednadžbe, jedna za deficit vodene pare procijenjen pomoću daljinskog istraživanja (VPD_RS) i jedna pomoću in-situ mjerenja (VPD_M):

$$m_{10h} (\%) = 7,86 + 140,94 * e^{-(3,73 * DVP_RS)} \quad (38)$$

$$m_{10h} (\%) = 6,79 + 27,43 * e^{-(1,05 * VPD_M)} \quad (39)$$

gdje su VPD_RS i VPD_M u [kPa].

Deficit vodene pare (VPD) je mjera sušnog kapaciteta zraka. Izračunava se iz zasićenog (saturiranog) tlaka vodene pare (VPsat) i tlaka vodene pare u zraku (VPair):

$$VPD = VP_{sat} - VP_{air} \quad (40)$$

U upotrebi su dvije jednadžbe za zasićeni tlak vodene pare (VPsat) u [kPa], starija koju je predložio (Tetens, 1930.):

$$VP_{sat} = 0,6107 * 10^{(7,5 * T / (T + 237,3))} \quad (41)$$

i novija koju je predložio (Bolton, 1980.), s manjim pogreškama pri nižim temperaturama:

$$VP_{sat} = 0,6112 * 10^{(17,67 * T / (T + 243,5))} \quad (42)$$

U oba slučaja T je u [°C].

Tlak vodene pare u zraku (VPair) u [kPa] definiran je kao:

$$VP_{air} = VP_{sat} * RH/100 \quad (43)$$

gdje je vrijednost RH u [%]. Konačno, deficit vodene pare (VPD) u [kPa] je:

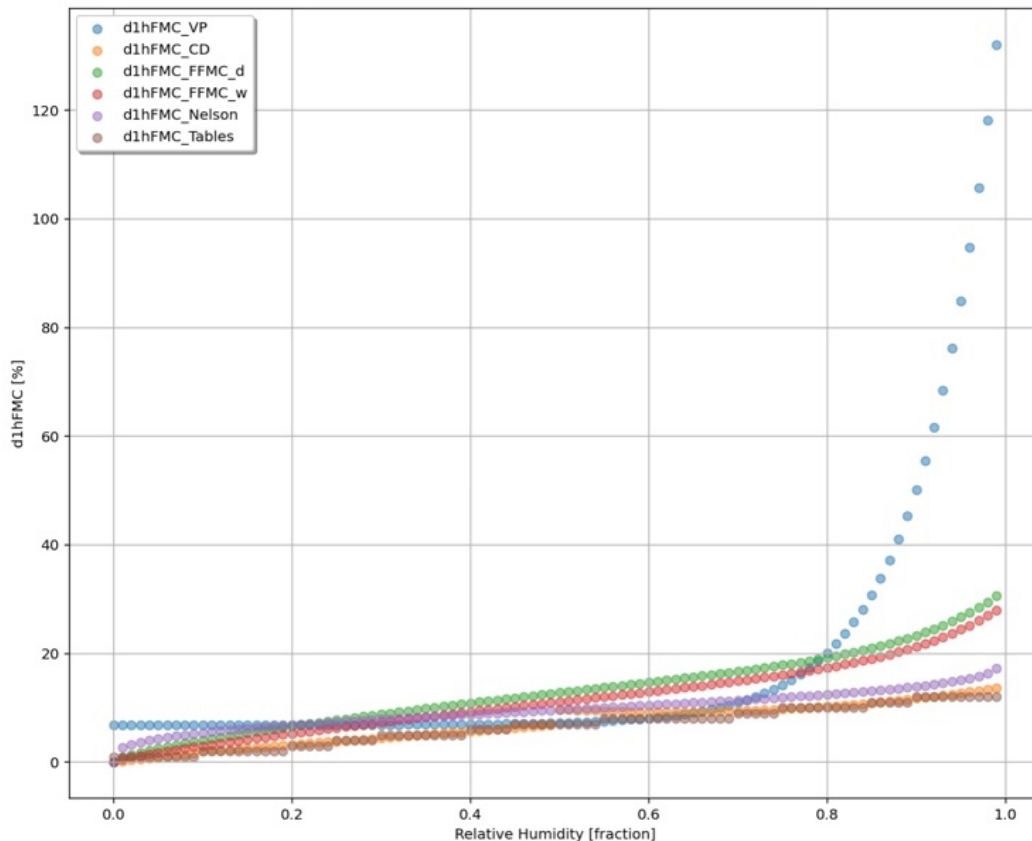
$$VPD = VP_{sat} - VP_{air} = VP_{sat} * (1 - RH/100) \quad (44)$$

Iako je ovdje fokus bio na 10-h gorivima za 10 sati, sadržaj vlage 1-h i 100-h goriva može se estimirati korištenjem Scott-Burgan scenarija vlažnosti: $d_{1h} = d_{10h} - 1$ i $d_{100h} = d_{10h} + 1$.

3.6. Usporedba različitih modela za proračun sadržaja vlage mrtvog goriva za različite temperature i vrijednosti relativne vlažnosti zraka

Slika 4. prikazuje usporedba različitih modela za računanje sadržaja vlage finog goriva m_{1h} za temperaturu $T = 25^{\circ}C$ i relativnu vlažnost zraka RH od 0 – 100%. Oznake na slici su slijedeće

- d1hFMC_Tables – BFMC tablice
- d1hFMC_Nelson – Nelsonov model
- d1hFMC_FFMC_w – FFMC model za vlažne uvijete
- d1hFMC_FFMC_d – FFMC model za suhe uvijete
- d1hFMC_CD - Cohen & Deeming model
- d1hFMC_VP – model na temelju deficita vodene pare

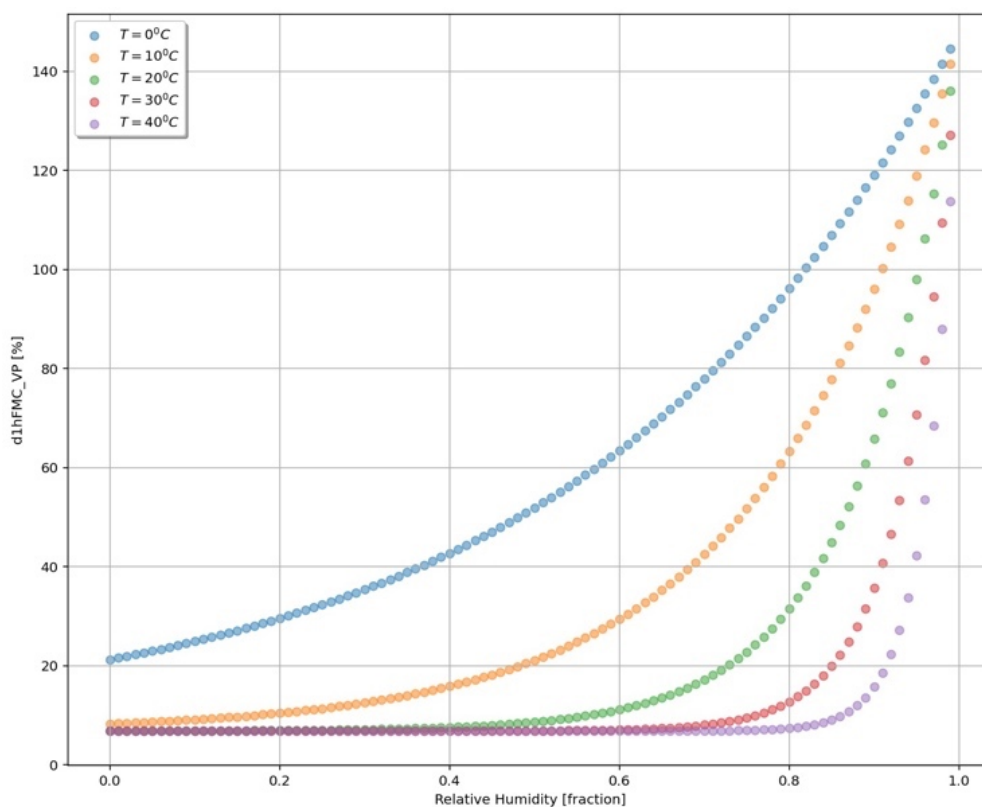


Slika 4. Usporedba različitih modela za računanje sadržaja vlage finog goriva m_{1h} za temperaturu $T = 25^{\circ}\text{C}$ i relativnu vlažnost zraka RH od 0 – 100% (iskazan kao udio od 0 – 1)

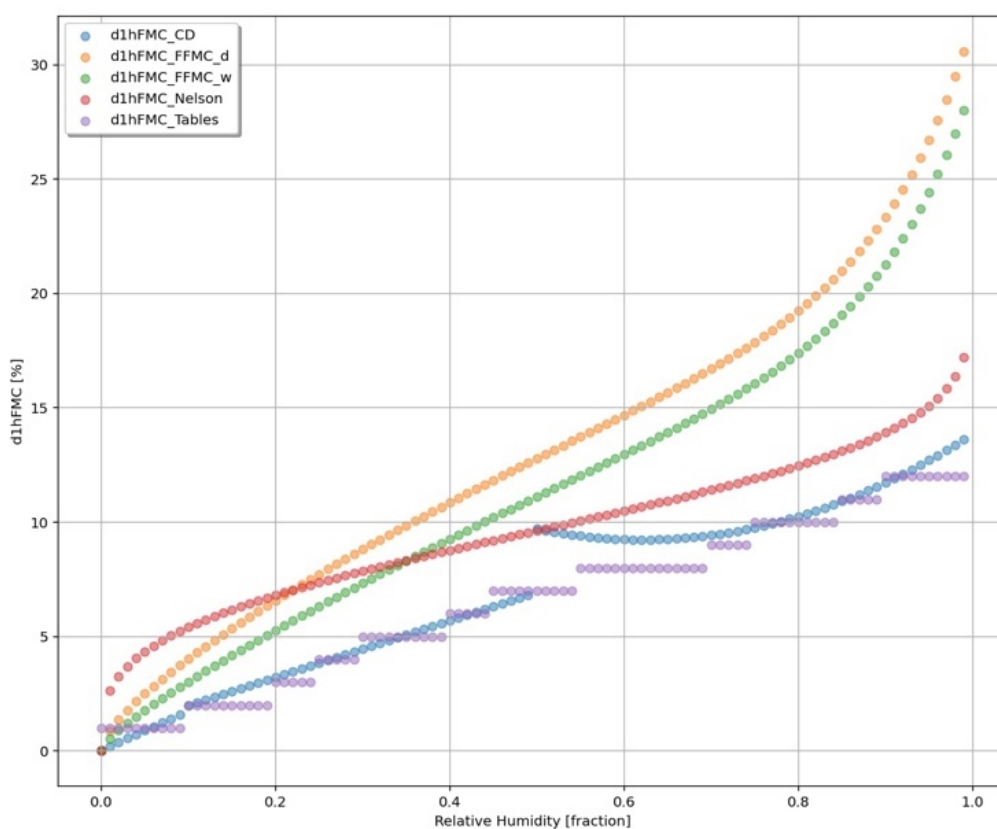
Većina modela ponaša se slično, a samo jedan značajno odstupa. To je model temeljen na **deficitu vodene pare**. Ima dvije slabe točke. Prva je singularnost za $\text{RH} = 100\%$, što se može primijetiti iz jednadžbi (39) i (40). Posljedica toga su nerealno visoke vrijednosti za $\text{RH} > 80\%$. Slična situacija javlja se i za druge temperature, kao što je prikazano na slici 5. Slika 5. također ilustrira drugu slabu točku modela temeljenog na deficitu vodene pare: vrlo male promjene u sadržaju vlage goriva za promjene relativne vlažnosti kada je temperatura zraka viša od 20°C . Stoga možemo očekivati da će model temeljen na deficitu vodene pare vjerojatno dati najlošiji rezultat.

Slika 6. također prikazuje usporedbu drugih modela kada isključimo model temeljen na deficitu vodene pare. Iz slike 6. možemo zaključiti da najniže vrijednosti sadržaja vlage mrtvog goriva daju dva modela: **BFMC tablice izvedene iz Fosberg & Deeming modela** i **Cohen & Deeming model**. Ova dva modela su prilično slična osim za vlažnost od 50%, gdje se za Cohen & Deeming model primjenjuje jednadžba (13), što rezultira naglim porastom sadržaja vlage (Slika 8.). Ako se jednadžba (12) primijeni na cijeli raspon od 10 do 100%, Cohen & Deeming model u potpunosti prati BFMC tablicu, kao što je prikazano na slici 9.

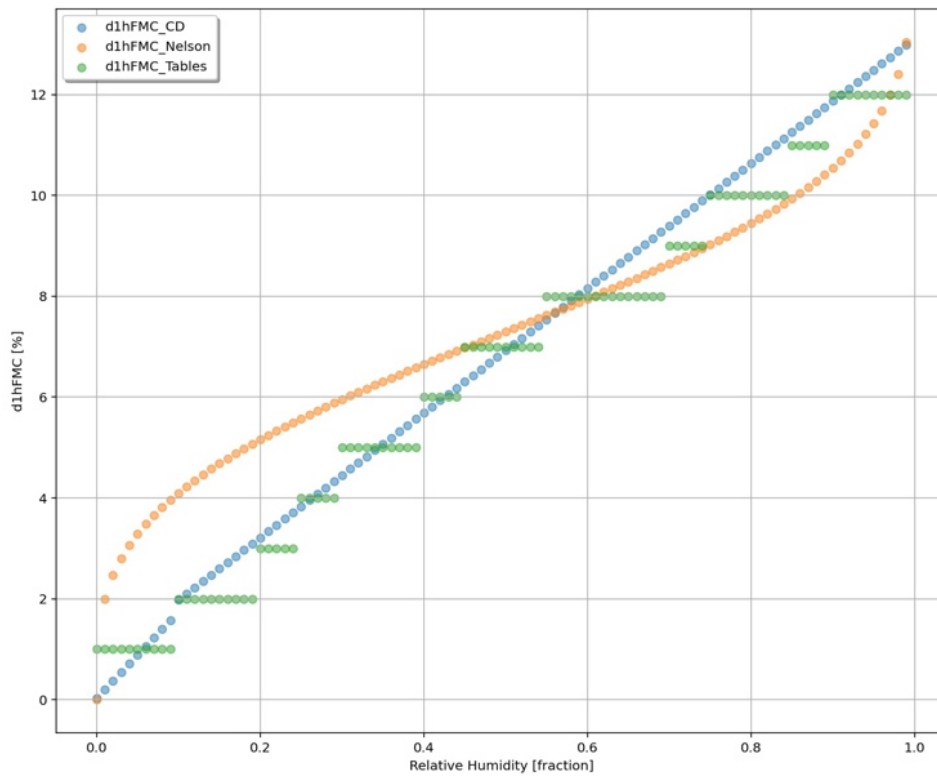
Slika 6. također pokazuje da modeli temeljeni na Van Wagnerovom ravnotežnom sadržaju vlage i FFMC kodu daju najviše vrijednosti, dok se Nelsonov model nalazi negdje između. Nelsonov model je blizu Cohen & Deeming modela, s neznatno višim vrijednostima. Smanjenjem koeficijenata u jednadžbi (18) na 0.8, rezultati Nelsonovog modela postaju vrlo bliski Cohen & Deeming modelu i BFMC tablicama, što je ilustrirano na slici 7.



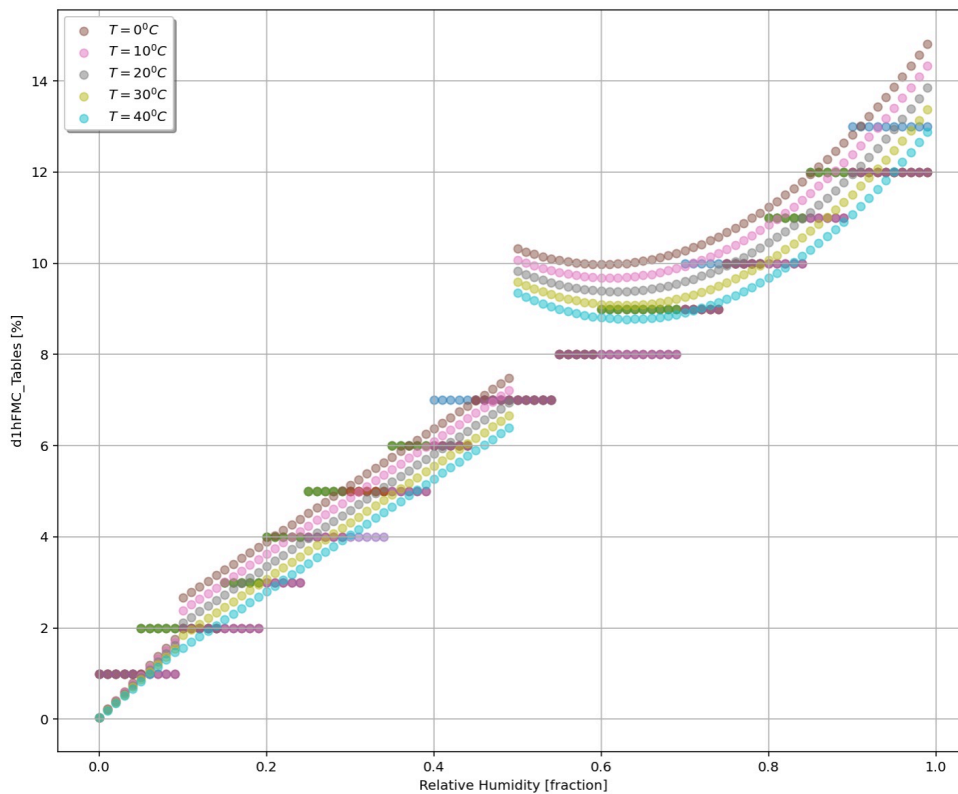
Slika 5. Sadržaja vlage finog goriva m1h za model temeljen na deficitu vodene pare ($d1hFMC_VP$), različite temperature T i relativnu vlažnost zraka RH od 0 – 100%



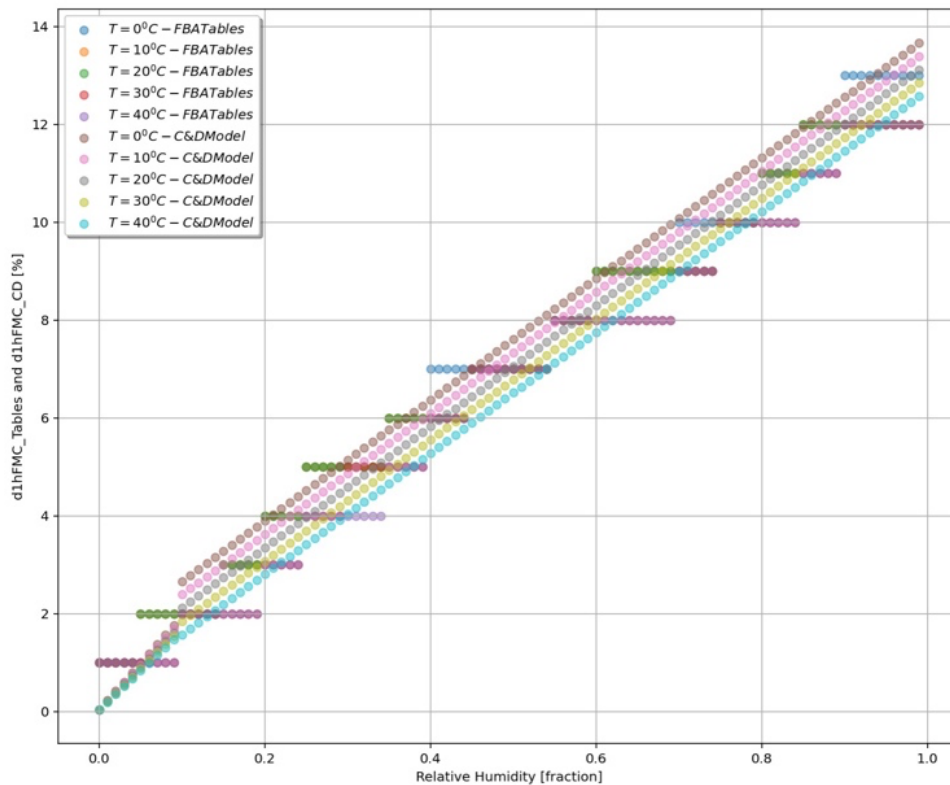
Slika 6. Usporedba različitih modela za računanje sadržaja vlage finog goriva m1h bez modela temeljenog na deficitu vodene pare za temperaturu $T = 25^\circ C$ i relativnu vlažnost zraka RH od 0 – 100%



Slika 7. Usporedba modela za računanje sadržaja vlage finog goriva m1h za modele temeljene na BFMC tablicama, korigiranom Cohen & Deeming modelu kod kojeg se jednađba (12) primjenjuje za cijelo područje relativne vlažnosti od 10 – 100% i korigiranom Nelsonovom modelu kod kojega je u jednađbi (18) koeficijent smanjen na 0,8 za temperaturu $T = 25^{\circ}\text{C}$ i relativnu vlažnost zraka RH od 0 – 100%



Slika 8. Sadržaj vlage finog goriva m1h za BFMC tablice i originalni Cohen & Deeming model za različite temperature i relativnu vlažnost zraka RH od 0 – 100%



Slika 9. Sadržaj vlage finog goriva m1h za BFMC tablice i korigirani Cohen & Deeming model kod kojeg se jednadžba (12) primjenjuje za cijelo područje relativne vlažnosti od 10 – 100% za različite temperature i relativnu vlažnost zraka RH od 0 – 100%

Dodatni problem s FBA tablicama je taj što vrijednosti sadržaja vlage vrlo malo ovise o promjenama temperature. Stoga bi se, kao zaključak, moglo naglasiti da je Cohen & Deeming model bolje rješenje jer pokazuje određenu negativnu ovisnost sadržaja vlage o temperaturi. Slika 8. prikazuje originalni Cohen & Deeming model u usporedbi s BFMC tablicama, dok slika 9. prikazuje prilagođeni Cohen & Deeming model u usporedbi s BFMC tablicama.

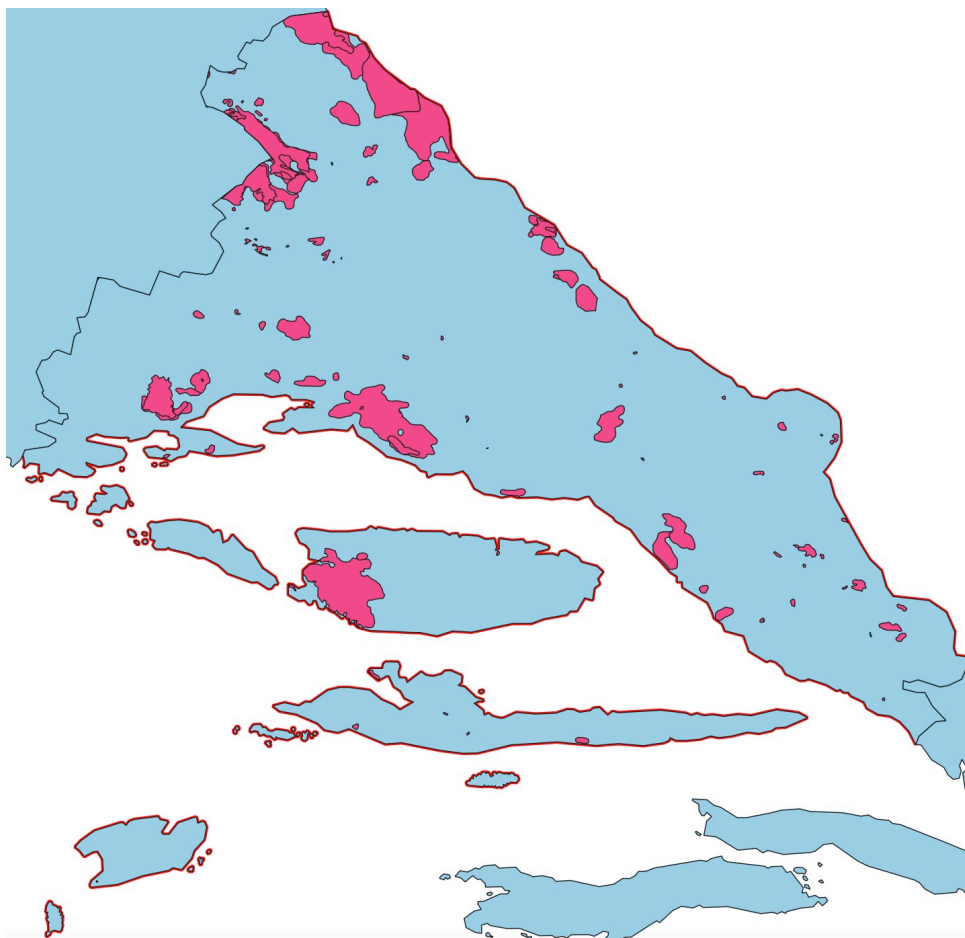
3.7. Usporedba različitih modela za proračun sadržaja vlage mrtvog goriva za povijesne požare u Splitsko – dalmatinskoj županiji

Splitsko-dalmatinska županija odabrana je kao područje studije slučaja za procjenu sadržaja vlage goriva za povijesne požare, posebno zato što je demonstracijsko područje projekta FirEURisk (FirEURisk, 2022.).

Osnovni podaci o povijesnim požarima većima od 1 ha u razdoblju od 2008. do 2022. preuzeti su iz repozitorija podataka Europskog informacijskog sustava za šumske požare (EFFIS, 2024.). U tom razdoblju u Splitsko-dalmatinskoj županiji zabilježeno je 117 šumskih požara, što je prikazano na slici 10. Najveći požar dogodio se 24. kolovoza 2012. godine, s izgorenom površinom od 6764 ha. 50. percentil (medijan) izgorene površine za ove požare je bila 8,69 ha, a 95. percentil 16,11 ha.

Preuzeli smo meteorološke podatke za sve povijesne požare iz repozitorija podataka ERA5 (ERA5, 2024.) i izračunali sadržaj vlage finog mrtvog goriva m1h koristeći sedam modela opisanih u poglavlju 3. Tablica 8. prikazuje kumulativne statističke rezultate, dok je na Slici 11. prikazan Box-and-Whisker grafikon. Oznake u tablici i slikama su: d1hFMC_VP – model temeljen na deficitu vodene pare, d1hFMC_CD – Cohen & Deeming model, d1hFMC_FFMC_d – FFMC EMC model za uvjete bez kiše, d1hFMC_FFMC_w – FFMC EMC model za uvjete s kišom, d1hFMC_Nelson – Nelson model,

d1hFMC_Tables – model temeljen na BFMC tablicama bez korekcije, d1hFMC_Tables_corr – model temeljen na BFMC tablicama s korekcijom.



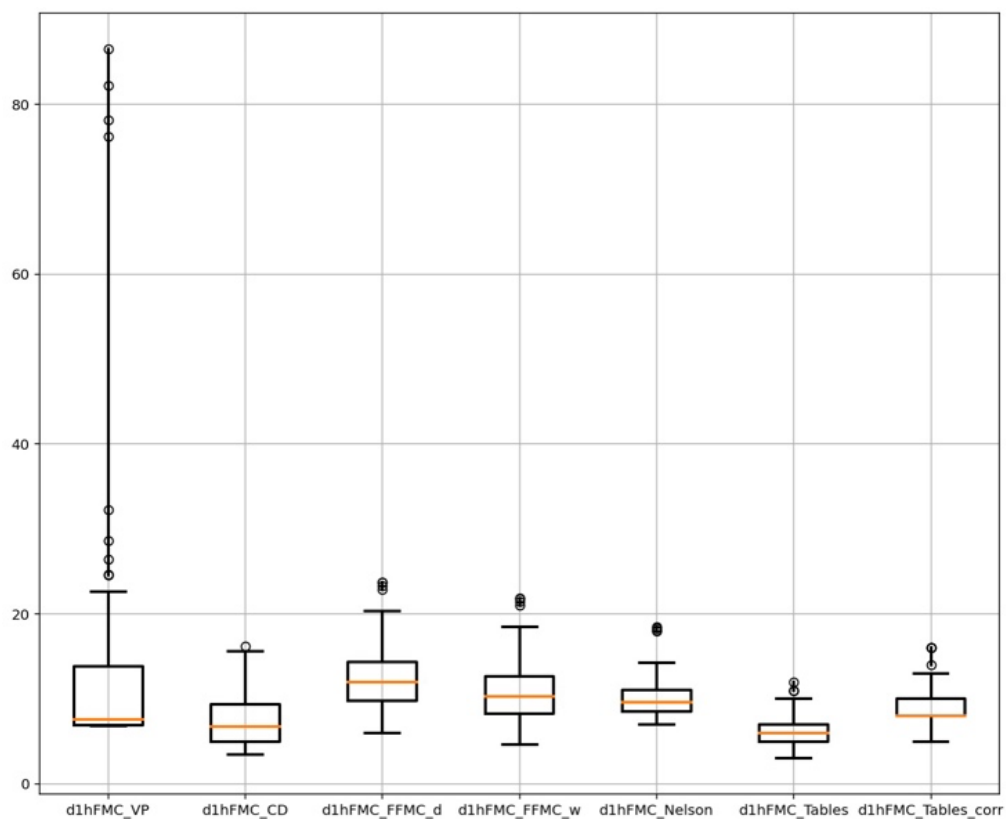
Slika 10. Povijesni požari veći od 1 ha od 2008. do 2022. na području Splitsko – dalmatinske županije koja je jedno od demonstracijskih područja projekta FirEURisk.

Tablica 8. Statistički podaci sadržaja vlage finog goriva (d1h) za meteorološke podatke povijesnih požara na području Splitsko-dalmatinske županije

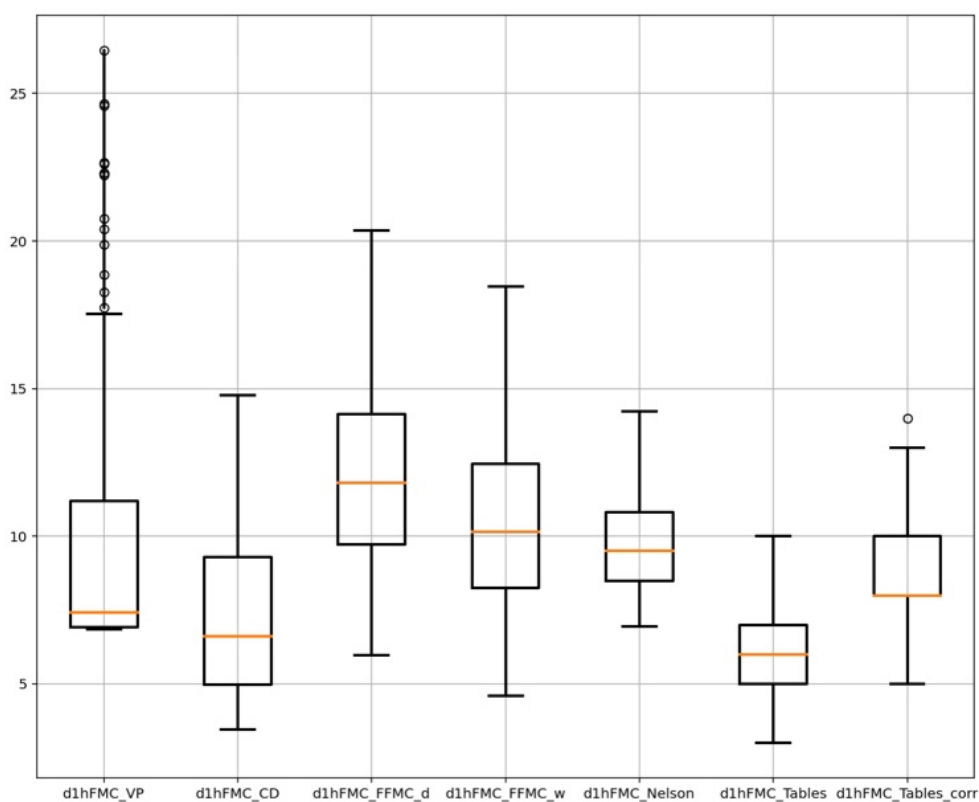
	Mean	Median	Standard deviation	5th Percentile
d1hFMC_VP	13.00	7.57	14.01	6.86
d1hFMC_CD	7.18	6.71	2.75	3.74
d1hFMC_FFMC_d	12.40	11.95	3.56	8.04
d1hFMC_FFMC_w	10.80	10.33	3.45	6.55
d1hFMC_Nelson	10.07	9.64	2.20	7.59
d1hFMC_Tables	6.26	6.00	1.83	4.00
d1hFMC_Tables_corr	8.89	8.00	2.29	5.80

Prema našim očekivanjima, najniže vrijednosti zabilježene su za **BFMC tablice** (d1hFMC_Tables) i **Cohen & Deeming model** (d1hFMC_CD). Rezultati za model temeljen na deficitu vodene pare (d1hFMC_VP) su po medijani blizu, ali na Box-and-Whisker grafikonu na Slici 11. može se primijetiti da model deficita vodene pare ima mnogo satelitskih vrijednosti u višem rasponu sadržaja vlage. Razlog tome je singularnost pri visokoj relativnoj vlažnosti zraka, zato što u skupu podataka povijesnih požara postoje požari s prilično visokom relativnom vlažnošću. Stoga smo ograničili sadržaj vlage goriva za model deficita vodene pare na 95. percentil (d1hFMC_VP < 26,89%).

Slika 12. prikazuje rezultatni Box-and-Whisker grafikon za sve originalne modele.

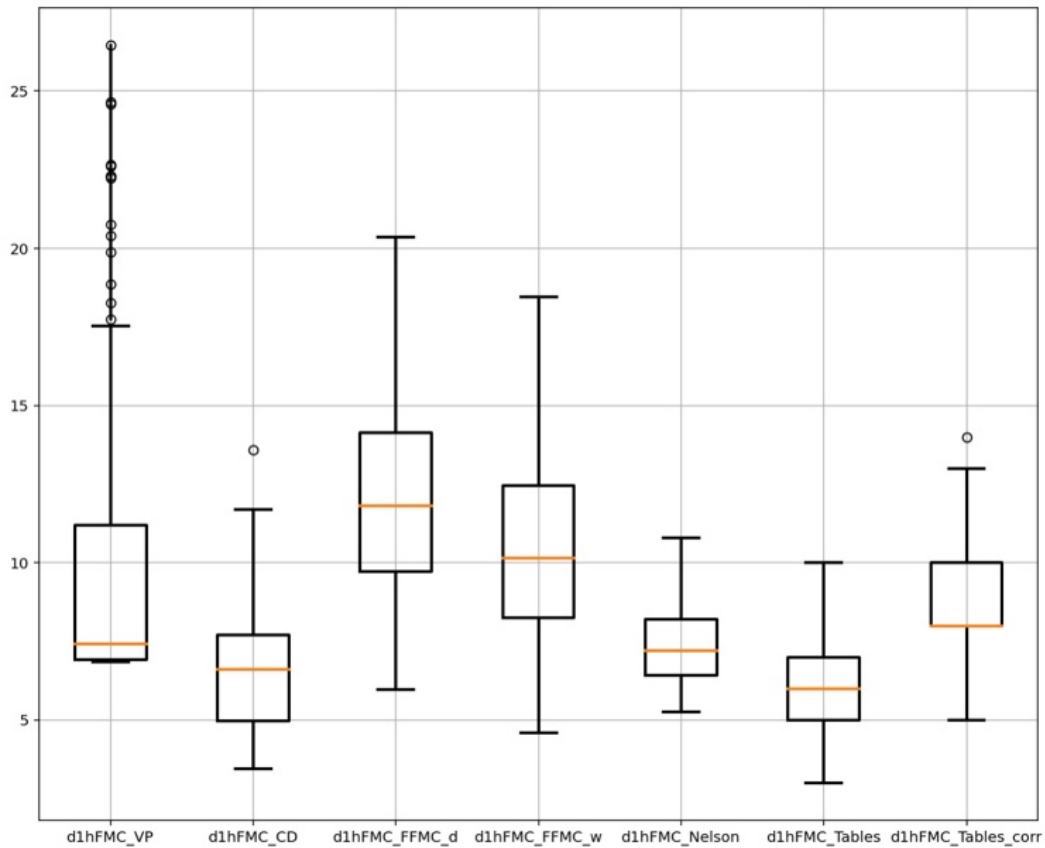


Slika 11. Box-and-Whisker dijagram za sve originalne modele proračuna sadržaja vlage d1h i povijesne požare.

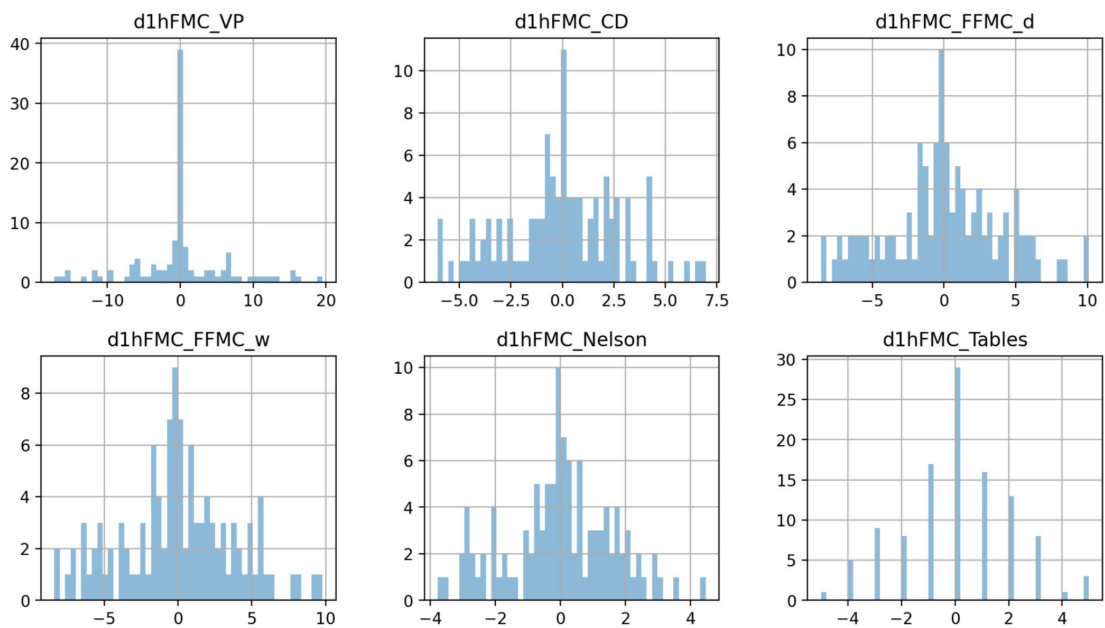


Slika 12. Box-and-Whisker dijagram za sve originalne modele proračuna sadržaja vlage d1h i povijesne požare, osim modela deficita pare kod kojeg smo vrijednosti ograničili na 95. percentil (d1hFMC_VP < 26,89%).

Slika 13. prikazuje Box-and-Whisker grafikon, a Slika 14. histograme kada se uz ograničavanje d1hFMC_VP, dodatno primjenjuje korekcija Cohen & Deeming modela koristeći jednadžbu (12) za cijeli raspon RH od 10% do 100%, te Nelson model s reduciranim koeficijentima u jednadžbi (18) na 0,8.



Slika 13. Box-and-Whisker dijagram proračunatog sadržaja vlage finog goriva d1h i povijesne požare, za originalne FFMC i BFMC modele i korigirane Cohen & Deeming i Nelson modele i ograničeni d1hFMC_VP model.



Slika 14. Histogrami proračunatog sadržaja vlage finog goriva d1h i povijesne požare za originalne FFMC i BFMC modele i korigirane Cohen & Deeming i Nelson modele i ograničeni d1hFMC_VP model.

Nakon korekcije Cohen & Deeming i Nelson modela promijenili su se i statistički parametri koje prikazuje Tablica 9. Vrijednosti za ova dva korigirana modela su se smanjile i još više približile vrijednostima nekorigiranih BFMC tablica.

Tablica 9. Statistički podaci sadržaja vlage finog goriva (d1h) za meteorološke podatke povijesnih požara na području Splitsko-dalmatinske županije za originalne FPMC, BFMC i VP modele, te korigirane Cohen & Deeming i Nelson modele

	Mean	Median	Standard deviation	5th Percentile
d1hFMC_VP	13.00	7.57	14.01	6.86
d1hFMC_CD	6.88	6.71	2.44	3.74
d1hFMC_FPMC_d	12.40	11.95	3.56	8.04
d1hFMC_FPMC_w	10.80	10.33	3.45	6.55
d1hFMC_Nelson	7.63	7.30	1.67	5.75
d1hFMC_Tables	6.26	6.00	1.83	4.00
d1hFMC_Tables_corr	8.89	8.00	2.29	5.80

3.8. Zaključak vezan uz određivanje sadržaja vlage mrtvog goriva (DFMC) na temelju meteoroloških parametara

BFMC tablice bez korekcije daju, barem statistički, najbolji rezultat u procjeni propagacijskog potencijala, jer je u procjeni propagacijskog potencijala bolje **precijeniti opasnost od širenja požara nego je podcijeniti**. Stoga preferiramo niže vrijednosti vlage mrtvog goriva. BFMC tablice ne samo da daju najmanju medijalnu vrijednost, već i prilično uzak i simetričan okvir između 1. i 3. kvartila (25. i 75. percentil), kao i vrlo bliske i simetrične gornje i donje granične vrijednosti (Slika 13.).

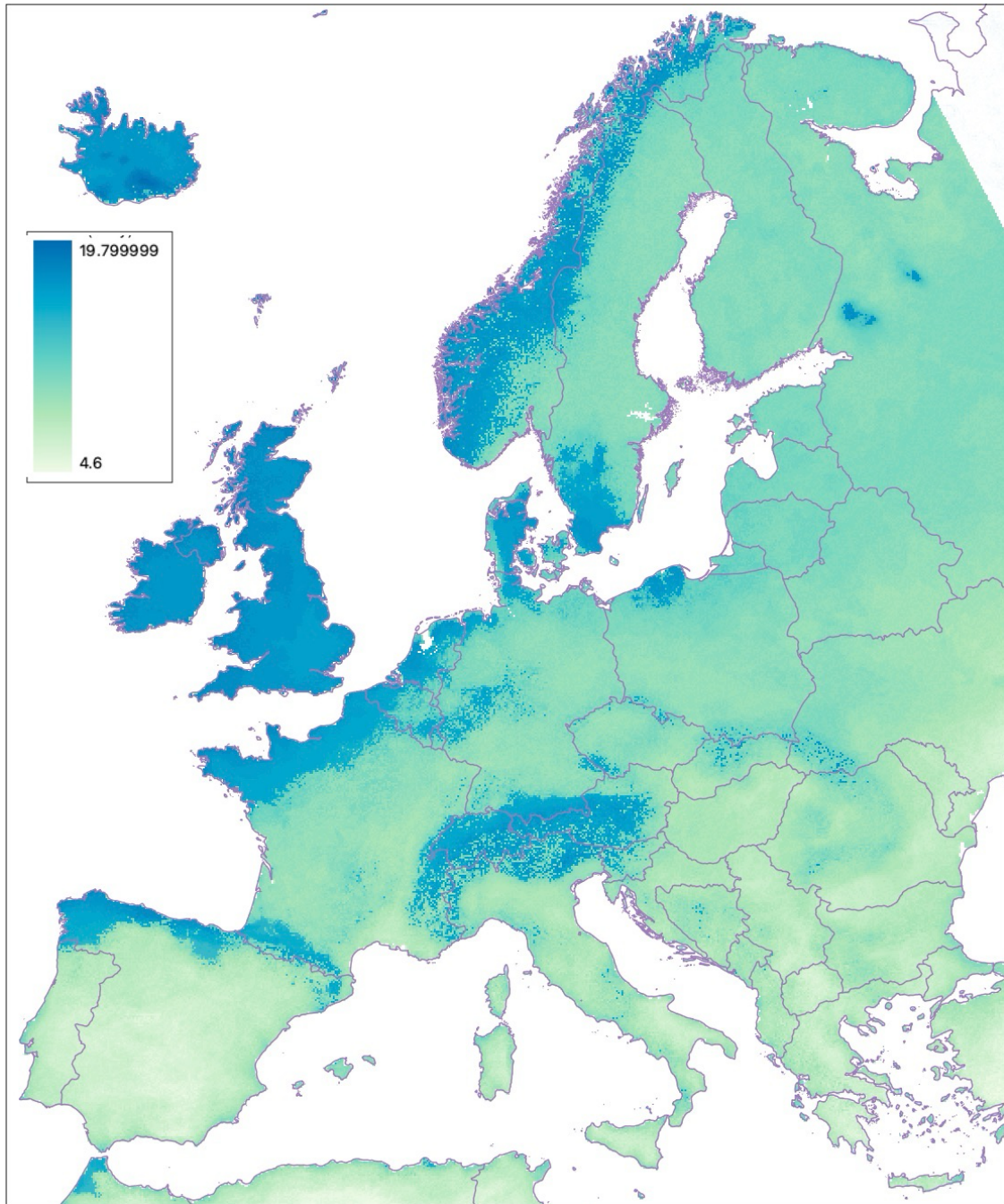
Originalni Cohen & Deeming model ima drugu najnižu medijalnu vrijednost, ali njegov okvir između 1. i 3. kvartila je širi i asimetričan (Slik12.). Moguće poboljšanje Cohen & Deeming modela bilo bi korištenje jednadžbe (12) za cijeli raspon relativne vlažnosti od 10% do 100%. Nakon korekcije medijalna vrijednost je ostala ista, ali se znatno smanjilo rasipanje vrijednosti i poboljšala simetričnost (Slika 13.).

Nelson model ima višu medijalnu vrijednost, ali su karakteristike njegovog okvira kod originalnog modela najbliže BFMC tablicama. Moguće poboljšanje bilo bi korigiranje koeficijenata u jednadžbi (18). Ako koristimo vrijednost 0,8 umjesto 1,053, medijalna vrijednost i rasipanje su se dosta popravili (Slika 13.).

Zbog toga su se za izračun propagacijskog potencijala u FirEURisk projektu koristile **BFMC tablice bez korekcije**, a kao prihvatljiva zamjena **korigirani Cohen & Deemingov model**, koji možda ima i određenu prednost, zato što daje kontinuirane vrijednosti za cijeli raspon promjene relativne vlažnosti zraka, a ne skokovite promjene kakve daju BFMC tablice (vidi Sliku 9.).

BFMC tablice daju sadržaj vlage finog goriva (m1h), a Cohen & Deeming model sadržaj vlage finog (m1h) i srednjeg (m10h) goriva. Ako se koriste BFMC tablice za određivanje ostalih kategorija (m10h, m100h), umjesto originalnih jednadžbi (4) – (7) koje zahtijevaju određivanje sadržaja vlage dva puta dnevno predložimo korištenje jednostavnijih Scott-Burgan scenarija vlažnosti (Tablica 6.) koji daju $d10h = d1h + 1$ (%) i $d100h = d1h + 2$ (%). Drugi pristup je korištenje Cohen & Deeming formule (9) za $d10h = 1,242 * d1h$ (%), a scenarije vlažnosti za $d100h = d10h + 1$ (%).

Primjer izgleda karti Europe s proračunatim d10h korištenjem BFMC tablica korištenih kod izračuna propagacijskog potencijala za povijesne požare na teritoriju Europe veće od 1000 ha od 2001. – 2019. Na Slici 15. je ekstremni d10h (5. percentil– vrijednost ispod koje se nalazi 5% donjih zabilježenih vrijednosti poredanih po veličini), a na Slici 16. srednji d10h (50. percentil – vrijednost ispod koje se nalazi 50% vrijednosti). Karte je u okviru projekta FirEURisk izradio MeteoGrid.



Slika 15: Karta ekstremnog (5. percentila) d10h u %, za povijesne požara na području Europe veće od 1000 ha u razdoblju 2001.-2019.(MeteoGrid)

U ekstremnom slučaju (5. percentil) vrijednosti su se kretale od 4,6% do 19,8%, a srednja vrijednost je bila 10,66%.

U srednjem slučaju (50. percentil) vrijednosti su se kretale od 6,6% do 20,4%, a srednja vrijednost je bila 16,62%.

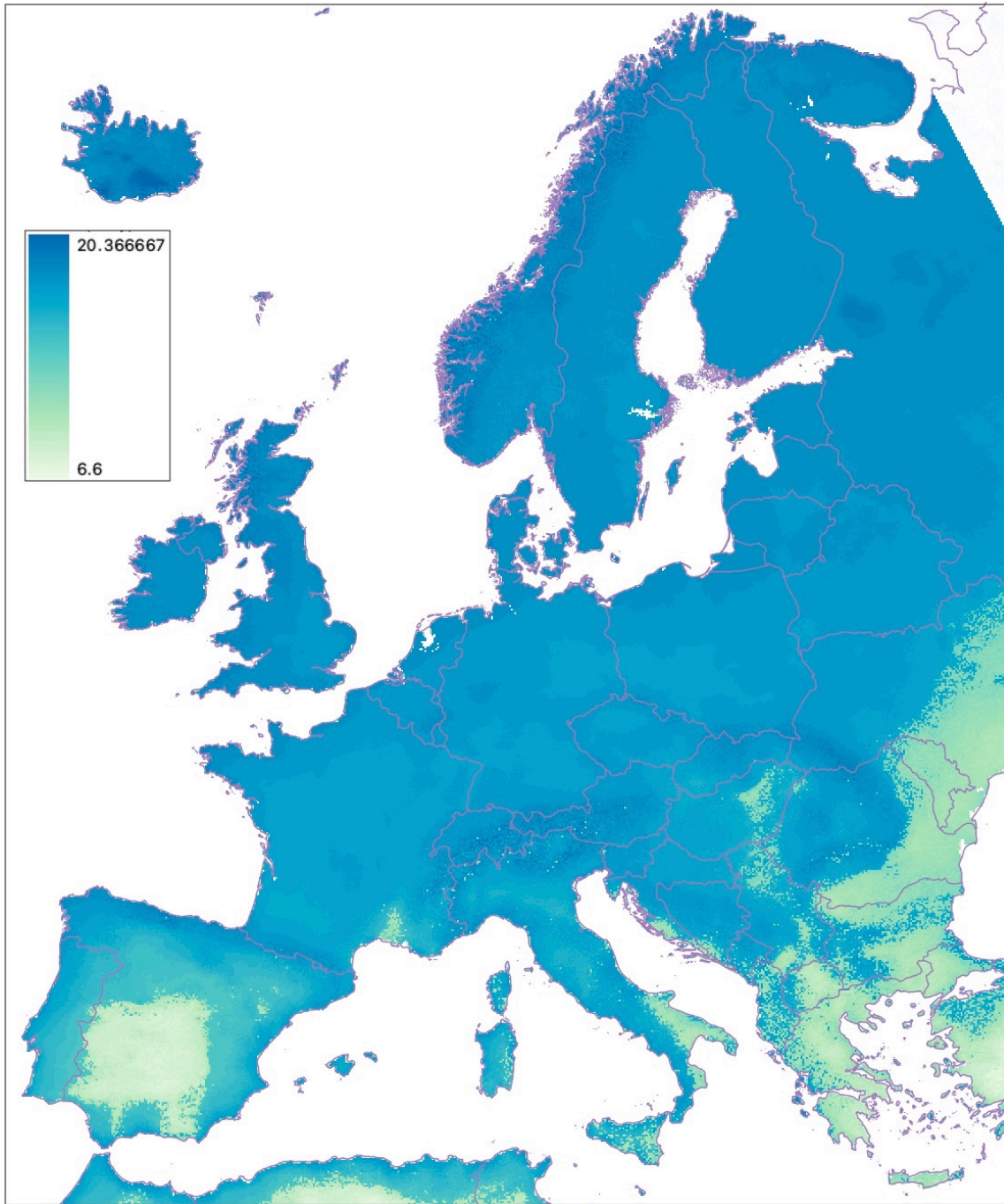


Figure 16: Karta srednjeg (50. percentila) d10h u %, za povijesne požara na području Europe veće od 1000 ha u razdoblju 2001.-2019.(MeteoGrid)

Vrijednosti vlage ostalih goriva (d1h, d100h) računane su korištenjem jednostavnijih Scott-Burgan scenarija vlažnosti (Tablica 6.).

4. Modeli za određivanje sadržaja vlage živog goriva (LFMC)

Sadržaj vlage živog goriva (engl. *LFMC – Live Fuel Moisture Content*) obično se dijeli u dvije skupine:

- živa zeljasta vegetacija (engl. *LH - Live Herbaceous*) i
- živa drvenasta vegetacija (engl. *LW - Live Woody*).

Kod zeljaste vegetacije, osobito onih povezanih sa sadržajem vlage u travama, lišću i sitnim granama, važan je sadržaj vlage fino živog goriva (engl. *LFFMC - Live Fine Fuel Moisture Content*).

Druga podjela, koju su koristili Pettinary i Chuvieco (Pettinary & Chuvieco, 2017.) je na:

- živa zeljasta goriva (engl. *LH - Live Herbaceous*)
- živa grmolika goriva (engl. *LS – Live Shrub*) i
- živa goriva u krošnjama (engl. *LC – Live Crown*)

Određivanje sadržaja vlage živih goriva je teže od određivanja vlage mrtvih goriva. Prema (Viegas et al, 2001.): „*U živim gorivima, sadržaj vlage u lišću i sitnim granama, ili sadržaj vlage sitnog živog goriva (LFFMC), ovisi o relativnoj brzini unosa vode kroz korijenje i gubitka vode transpiracijom. Budući da su obje brzine kontrolirane različitim fizičkim i biološkim varijablama, procjena vlage živog goriva mnogo je teža nego kod mrtvog goriva. U praksi se mora fizički mjeriti. U protivnom, moraju se koristiti vrlo grube procjene vlage živog goriva.*“

U praksi je nekoliko različitih pristupa određivanja sadržaja vlage, od krajnje jednostavnih, temeljenih na scenarijima vlažnosti do kompleksnih temeljenih na daljinskim istraživanjima multi-spektralnih satelitskih slika:

1. Postupak određivanja sadržaja vlage živih goriva korištenje Scott-Burganovih scenarija vlažnosti (Scott & Burgan, 2005.) i tablica za jednostavnu, ali grubu estimaciju sadržaja vlage živih goriva.
2. Postupak određivanja sadržaja vlage živih goriva korištenjem meteoroloških podataka.
3. Postupak određivanja sadržaja vlage živih goriva daljinskim istraživanjima analizom satelitskih slika.

U nastavku spominjemo neke od ovih postupaka i to prvenstveno one koje su korištene u okviru FirEUrisk projekta. Zanimaju nas jedino postupci koji kao svoj konačni cilj daju karte s prostornom raspodjelom sadržaja vlage na temelju kojih se računa propagacijski potencijal i rizik od požara.

4.1. Određivanje sadržaja vlage živih goriva temeljeno na scenarijima vlažnosti

Jednostavan postupak određivanja sadržaja vlage mrtvih i živih goriva predložili su Scott i Burgan (Scott & Burgan, 2005.) temeljen na **scenarijima vlažnosti goriva** (engl. *Fuel Moisture Scenarios*). Predložili su 4 scenarija za mrtvo i živo gorivo. Mrtvo gorivo su podijelili na fino (m1h), srednje (m10h) i veliko (m100h), a živo gorivo na živo zeljasto (LH) i živo drvenasto (LW). Pettinary i Chuvieco (Pettinary & Chuvieco, 2017.) su živo gorivo podijelili u tri klase: živo zeljasto, živo grmoliko (LS) i živo gorivo u krošnjama (LC). Po vrijednostima klase LH se poklapaju, klasa LC odgovara Scott-Burganovoj klasi LW, a nova klasa LC ima drugačije vrijednosti. Tablica 10. prikazuje scenarije vlažnosti i za mrtva i živa goriva.

Tablica 10. Scenariji sadržaja vlage u gorivu (%) prema (Scott & Burgan, 2005.) i (Pettinary & Chuvieco, 2017.) koji su dodali i sadržaj vlage u krošnjama.

mrtvo gorivo	D1 - vrlo mali	D2 - mali	D3 - umjereni	D4 - veliki
1-h	3	4	5	6
10-h	4	5	6	7
100-h	5	6	7	8
živo gorivo	L1 - vrlo mali svi zeljasti dijelovi osušeni	L2 - mali 2/3 zeljastih dijelova osušeno	L3 – umjereni 1/3 zeljastih dijelova osušeno	L4 – veliki svi zeljasti dijelovi zeleni
trave	30	60	90	120
grmlje	60	90	120	150
krošnje	60	60	120	150

Primjena tablica je krajnje jednostavna. Pretpostavlja se da se scenarija za mrtvo i živo gorivo poklapaju, pa imamo samo 4 kumulativna scenarija D1L1, D2L2, D3L3 i D4L4 (Pettinary & Chuvieco, 2017.). Na temelju poznavanja vlage mrtvog goriva za neki od scenarija, npr. m10h za scenarij D1L1, iz Tablice 10. se uzimaju odgovarajuće vrijednosti sadržaja vlažnosti za sve ostale nepoznate klase.

Ovaj je postupak korišten u projektu FirEURisk za izračun propagacijskog potencijala za povijesne požare veće od 1 ha na području Splitsko-dalmatinske županije (Stipaničev et al., 2024.), ali i za izračun propagacijskog potencijala na temelju povijesnih požara većih od 2000 ha na području cijele Europe (Alcasena et al, 2023.).

4.2. Određivanje sadržaja vlage živih goriva temeljeno na meteorološkim podacima

Iako svi autori naglašavaju da je vrlo nepouzdana određivati sadržaj vlage živog goriva samo na temelju meteoroloških podataka, bilo je pokušaja temeljenih na traženju korelacije između izmjerenih vrijednosti i meteoroloških podataka. Ovdje ćemo spomenuti dva takva pokušaja.

4.2.1. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju pokazatelj vlažnosti krupnog goriva (DC)

Prvi primjer je pokušaj procjene sadržaja vlage živih goriva na temelju pokazatelj vlažnosti krupnog goriva. Viegas i suradnici (Viegas et al., 2001.) su proveli intenzivna terenska istraživanja sadržaja vlage nekoliko tipova finog goriva (grmlje i živo lišće) u središnjem Portugalu i Kataloniji (sjeveroistočna Španjolska) tijekom 1–10 godina. Rezultate su pokušali korelirati s pokazateljem vlažnosti krupnog goriva (engl. *DC - Drought Code*) kanadskog sustava za određivanje meteorološkog indeksa opasnosti od požara raslinja (engl. *FWI – Fire Weather Indeks*) i dobili dobre rezultate. Problem je što su empirijske korelacijske jednadžbe kalibrirane za područja gdje su istraživanja provedena i vrste koje u njima rastu. Korelacijski koeficijent u jednadžbama variraju ne samo ovisno o vrsti, već i o lokaciji i razdoblju godine, stoga ova metodologija nije primjenjiva na šira područja.

4.2.2. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju indeksa vegetacijske sezone

Drugi primjer je način proračuna sadržaja vlage živog goriva korišten u **2016 USA Nacionalnom sustavu za ocjenu opasnosti od požara (NFDRS)**. Temelji se na **indeksu vegetacijske sezone** (engl. *GSI -*

Growing Season Index)¹ (Jolly et al., 2005.), meteorološki utemeljenom, generaliziranom fenološkom modelu koji predviđa stanje živog goriva na temelju dnevnih meteoroloških opažanja. GSI se računa iz:

- Fotoperiode (Photo) izračunate iz duljine dana na temelju geografske širine i dana u godini.
- Izmjerene 24 satne minimalne temperature (Tmin).
- Evaporacijskog zahtjeva iskazanog deficitom vodene pare (VPD) koji se računa iz temperature i relativne vlažnosti (vidi jednadžbe (41) i (44)).

Sve tri veličine se normiraju tako da u rasponu od minimalnih do maksimalnih vrijednosti imaju vrijednost između 0 i 1. Granice koje se primjenjuju u 2016 NFDRS za minimalne i maksimalne vrijednosti prikazuje u Tablici 11.

Tablica 11. Minimalne i maksimalne vrijednosti varijabli za proračun indeksa vegetacijske sezone (GSI) (Jolly et al., 2005.).

	minimalna	maksimalna
Tmin	-2°C (Tmin _{min})	5°C (Tmin _{max})
VPD	900 Pa (VPD _{min})	4100 Pa (VPD _{max})
Photo	36000 sek (Photo _{min})	39600 sek (Photo _{max})
LH (Live Herb)	30% (LH _{min})	250% (LH _{max})
LW (Live Woody)	60% (LW _{min})	200% (LW _{max})

Normirane vrijednosti se računaju jednadžbama:

$$iT_{min} = \begin{cases} 0 & \text{za } T_{min} \leq T_{min_{min}} \\ \frac{T_{min} - T_{min_{min}}}{T_{min_{max}} - T_{min_{min}}} & \text{za } T_{min_{min}} < T_{min} < T_{min_{max}} \\ 1 & \text{za } T_{min} \geq T_{min_{max}} \end{cases} \quad (45)$$

$$iVPD = \begin{cases} 0 & \text{za } VPD \geq VPD_{max} \\ 1 - \frac{VPD - VPD_{min}}{VPD_{max} - VPD_{min}} & \text{za } VPD_{min} < VPD < VPD_{max} \\ 1 & \text{za } VPD \leq VPD_{min} \end{cases} \quad (46)$$

$$iPhoto = \begin{cases} 0 & \text{za } Photo \leq Photo_{min} \\ \frac{Photo - Photo_{min}}{Photo_{max} - Photo_{min}} & \text{za } Photo_{min} < Photo < Photo_{max} \\ 1 & \text{za } Photo \geq Photo_{max} \end{cases} \quad (47)$$

Indeks vegetacijske sezone (GSI) se računa jednostavnim množenjem:

$$GSI = iT_{min} * iVPD * iPhoto \quad (48)$$

GSI također ima vrijednost na intervalu od 0 do 1. Interpretira se u skladu s Tablicom 12. kod koje se razlikuje i trend, da li GSI raste (od proljeća prema jeseni) ili pada (od jeseni do proljeća). Za granicu početka vegetacije (zelenjenja, prolistavanja) (engl *GU – Greenup Treshold*) 2016 NFDRS je uzeo vrijednost 0,5.

Tijekom validacije indeks vegetacijske sezone (GSI) je pokazao dobro podudaranje sa satelitskim Normaliziranim diferencijalnim indeksom vegetacije (NDVI). Kao motivaciju proračuna ovog indeksa iz meteoroloških podataka autori (Jolly et al., 2005.) su istakli da je na taj način moguće modelirati buduća događanja za koja nema satelitskih slika.

Ostaje još na kraju povezati GSI sa sadržajem vlage živih goriva.

¹ Prezentacija indeksa vegetacijske sezone se može pronaći na <https://www.youtube.com/watch?v=w8Ukio93BMU>

Tablica 12. Interpretacija indeksa vegetacijske sezone (GSI) (Jolly et al., 2005.).

	interpretacija
GSI raste (od proljeća do jeseni)	
0 – 0,5	mirovanje
> 0,5	početak vegetacije (zelenjenje, prolistavanje)
0,75 - 1	potpuni razvoj krošnje biljaka
GSI pada (od jeseni do proljeća)	
1 – 0,5	sušenje zeljaste vegetacije
< 0,5	otpadanje lišća - ulazak u potpuno sušenje ili mirovanje

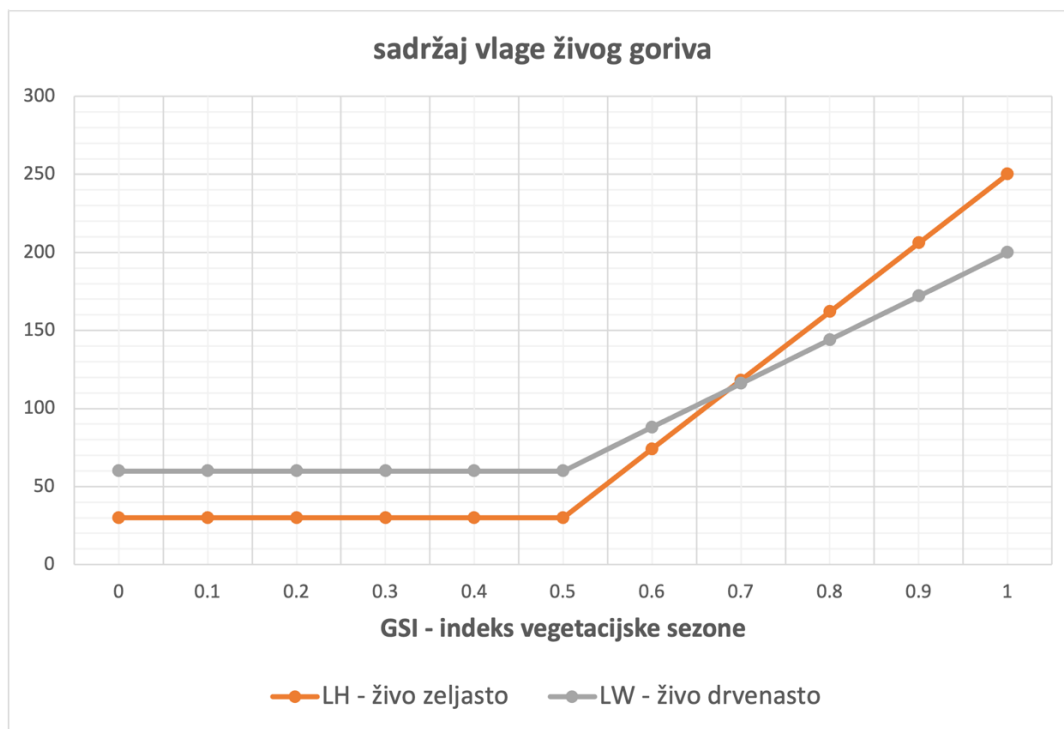
Osim indeksa GSI za određivanje sadržaja vlage živog goriva treba još granična vrijednost prolistavanja (GU) koja je ista i za zeljastu i drvenastu vegetaciju i iznosi $GU_H = GU_W = GU = 0,5$, te minimalne i maksimalne vrijednosti sadržaja vlage iz Tablice 11. koje se razlikuju za zeljastu i drvenastu vegetaciju (Jolly, 2018.) .

$$Lx = \begin{cases} Lx_{min} & \text{za } GSI < GUx \\ mx \cdot GSI + bx & \text{za } GSI \geq GUx \end{cases} \quad (49)$$

$$mx = \frac{Lx_{max} - Lx_{min}}{1 - GUx} \quad (50)$$

$$bx = Lx_{max} - mx = \frac{Lx_{min} - Lx_{max} \cdot GUx}{1 - GUx} \quad (51)$$

gdje x zamjenjuje zeljastu (x = H) i drvenastu (x = W) vegetaciju. Slika 17. prikazuje promjene sadržaja vlage za zeljastu (LH) i drvenastu (LW) vegetaciju za $GU = 0,5$, minimalne i maksimalne vrijednosti varijabli iz Tablice 11. i promjenu indeksa vegetacijske sezone (GSI) od 0 do 1.



Slika 17. Promjene sadržaja vlage za zeljastu (LH) i drvenastu (LW) vegetaciju za $GU = 0,5$, minimalne i maksimalne vrijednosti varijabli iz Tablice 11. i promjenu indeksa vegetacijske sezone (GSI) od 0 do 1 prema (Jolly, 2018.).

Osnovni problem ovog pristupa je kalibracija za područje Europe, pa je i to jedan od razloga zašto nije dalje razmatran u okviru FirEURisk projekta, već se pažnja prvenstveno usmjerila na treću grupu postupaka određivanja sadržaja vlage živih goriva temeljenu na satelitskim daljinskim istraživanjima.

4.3. Određivanje sadržaja vlage živih goriva temeljeno na satelitskim daljinskim istraživanjima

Satelitska tehnologija omogućuje kontinuirano, globalno i vremenski ažurno praćenje stanja vegetacije, što je ključno za razumijevanje dinamike sadržaja vlage živih goriva. Korištenjem podataka iz različitih satelita, poput optičkih i mikrovalnih senzora, mogu se procijeniti sezonske i prostorne varijacije u sadržaju vlage živog goriva. Danas je to sigurno postupak koji se najviše koristi.

Puno je različitih pristupa primjeni satelitskih daljinskih istraživanja u procjeni sadržaja vlage živih goriva, ali ćemo se ovdje ograničiti samo na one koji su istraživani tijekom rada na projektu FirEURisk.

4.3.1. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju optičke dubine vegetacije

Prvi postupak se temelji (Forkel et al., 2023.) na pasivnim satelitskim mikrovalnim opažanjima optičke dubine vegetacije (engl. *VOD – Vegetation Optical Deep*). Vegetacijska optička dubina (VOD) je satelitski promatrana varijabla koja opisuje sposobnost vegetacije da apsorbira i rasprši mikrovalno zračenje. Veća VOD vrijednost ukazuje na više sadržaja vode ili veću količinu biomase. Proporcionalan je sadržaju vode u vegetaciji (engl. *VWC - Vegetation Water Content*), tj. masi vode po jedinici površine koja ovisi o suhoj biomasi (m_{dry}) i sadržaju vlage živog goriva (engl. *LFMC – Live Fuel Moisture Content*).

$$VOD = b * VWC = b * m_{dry} * LFMC \quad (52)$$

gdje je b parametar koji ovisi o vrsti vegetacije i valnoj duljini. Istraživači s Technische Universität Dresden (TUD), Njemačka predložili su nekoliko modela proračuna LFMC iz VOD-a, validirali ih, te odabrali najbolje koje su primijenili na izradu dnevnih globalnih karata sadržaja vlage živih goriva (VOD2LFMC) od 1988. – 2000. i 2000. – 2017. u rezoluciji 0,25 stupnjeva. Više detalja u (Forkel et al., 2023.).

4.3.2. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju satelitskih slika i vidljivog atmosferskog otpornog indeksa

Drugi postupak, prema metodi opisanoj u (Caccamo i sur., 2012), temelji se na MODIS satelitskim multi-spektralnim snimkama i indeksima preračunatim iz njih. Sadržaja vlage živog goriva (LFMC) računa se jednadžbom:

$$LFMC = [85,93 + NDIIb6_{max-min} \cdot 25,21 + VARI_{max-min} \cdot 15,90] \quad (53)$$

gdje su:

$NDIIb6_{max-min}$ - **normalizirani indeks razlike infracrvenog područja – kanal 6** (engl. *NDIIb6, Normalised Difference Infrared Index – band 6*):

$$NDIIb6 = \frac{NIR-SWIR}{NIR-SWIR} = \frac{Modis_band\ 2 - Modis_band\ 6}{Modis_band\ 2 + Modis_band\ 6} \quad (54)$$

Indeks se još dodatno normalizira u odnosu na minimalne i maksimalne vrijednosti:

$$NDIIb6_{max-min} = \frac{NDIIb6 - NDIIb6_{min}}{NDIIb6_{max} - NDIIb6_{min}} \quad (55)$$

Modis band 2 je blisko infracrveno područje (engl. *NIR – Near Infrared*) valnih duljina 841 – 876 nm, a band 6 kratkovalno infra crveno područje (engl. *SWIR – Short-Wave Infrared*) valnih duljina 1628–1652 nm.

$VARI_{max-min}$ - **vidljivi atmosferski otporni indeks** (engl. *VARI - Visible Atmospherically Resistant Index*), koji se koristi za procjenu zelenila vegetacije na temelju spektralnih informacija prikupljenih satelitskim sensorima. Osmišljen je kako bi bio manje osjetljiv na atmosferske utjecaje poput raspršenja aerosola i promjena u osvjetljenju u vidljivom dijelu spektra (crvena, zelena i plava svjetlost). Računava se prema formuli:

$$VARI = \frac{Green-Red}{Green-Red+Blue} = \frac{Modis_band\ 4-Modis_band\ 1}{Modis_band\ 4-Modis_band_1+Modis_band_3} \quad (56)$$

Dodatno se normalizira u odnosu na minimalne i maksimalne vrijednosti:

$$VARI_{max-min} = \frac{VARI-VARI_{min}}{VARI_{max}-VARI_{min}} \quad (57)$$

Modis band 1 je crveno područje vidljivog spektra (engl. *Red*) valnih duljina 620 – 670 nm, band 3 plavo područje vidljivog spektra (engl. *Blue*) valnih duljina 459–479 nm, a band 4 zeleno područje vidljivog spektra (engl. *Green*) valnih duljina 545–565 nm.

Kalibracija modela je provedena na području jugoistočne Australije za tri vrste vegetacije: grmljaci, vrištine i šume sklerofilnog drveća. Kako je model empirijski, a vegetacija Australije i vegetacija Europe se razlikuju, trebalo bi ga re-kalibrirati za pojedina područja Europe.

Par godina kasnije u istraživanju (Nolan i sur., 2016b) jednadžba za proračun sadržaja vlage je dalje pojednostavljena na način da se sadržaj vlage živog goriva (LFMC) procjenjuje samo na temelju normaliziranog VARI indeksa:

$$LFMC = 52.51 \cdot e^{1.36 \cdot VARI_{max-min}} \quad (58)$$

Kalibracija ovog modela provedena je za šume i šumska područja na površini od 117059 km² u jugoistočnoj Australiji. Zbog toga se ovaj model može smatrati prikladnim za procjenu sadržaja vlage drvenastog goriva (LW), ali ga je potrebno dodatno kalibrirati za vegetaciju na području Europe. Umjesto Modis satelita sigurno je moguće koristiti i odgovarajuće kanale Santinel satelita.

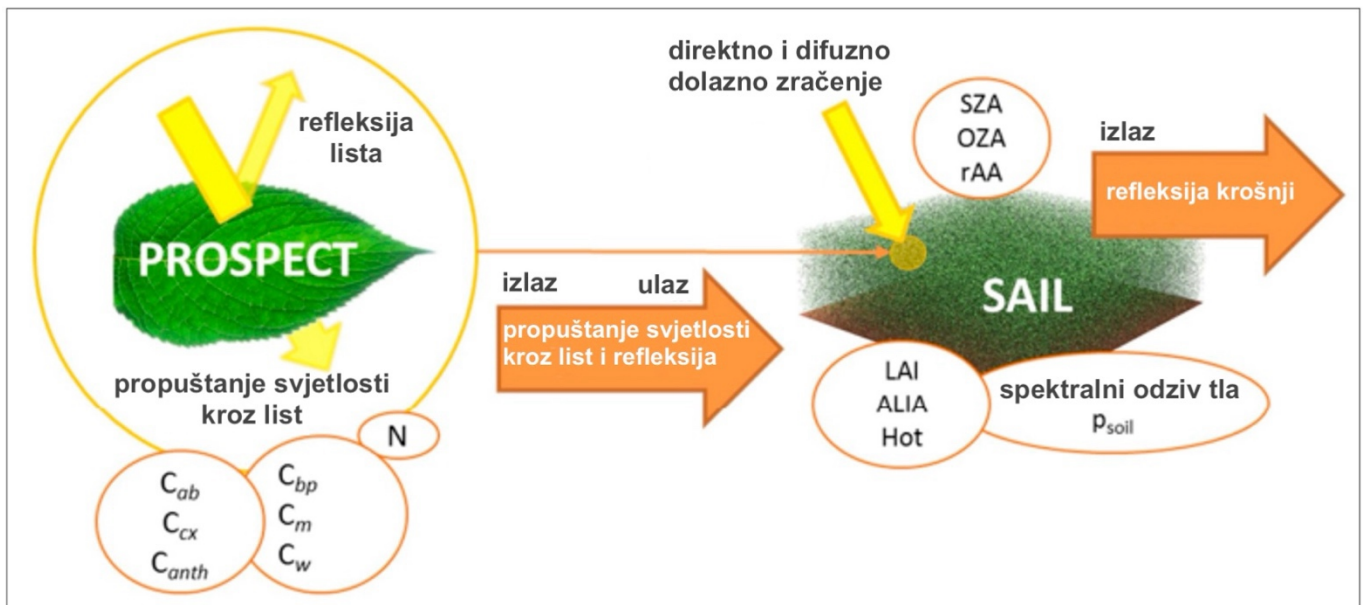
4.3.3. Određivanje sadržaja vlage živih goriva na temelju satelitskih slika i modela prijenosa zračenja

Treći postupak, koji je u okviru projekta FirEurisk korištenjem za proračun dinamičkog dnevnog sadržaja vlage živih goriva (LFMC) razradili su istraživači sa Sapienza Università di Roma, Italija (Pampanoni, 2023.), (Pampanoni et al., 2022.), (Pampanoni et al., 2023.). Temelji se na **modelu prijenosa zračenja** (engl. *RTM - Radiative Transfer Models*) i satelitskim slikama satelita Santinel-3 i Santinel-2.

U znanstvenoj literaturi modeli prijenosa zračenja široko se koriste za procjenu reflektirane radijacije povezane s različitim kombinacijama biofizičkih varijabli. Međutim, često je zanimljivije postupiti obrnuto, tj. rekonstruirati kombinaciju biofizičkih varijabli koja je generirala radijaciju zabilježenu određenim instrumentom, poput senzora instaliranog na satelitu. U tu svrhu razvijene su i testirane brojne metode inverzije (engl. *IMs - Inversion Methods*). Postupak određivanja sadržaja vlage živog goriva temelji se na postupku inverzije modela prijenosa zračenja. U okviru projekta FirEurisk istraživači sa Sapienza Università di Roma, Italija, predloženi su postupak validirali pomoću terenskih uzoraka prikupljenih od strane drugih partnera FirEurisk projekta, te javno dostupnih skupova podataka o sadržaju vlage živog goriva.

Model prijenosa zračenja koji je korišten u ovom slučaju pripada skupini PROSAIL koja je nastala kombinacijom modela PROSPECT i modela SAIL (Berger et al., 2018.). PROSAIL kombinira model optičkih svojstava lista PROSPECT s modelom SAIL koji modelira prijenos zračenja kroz srednje zamućenu krošnju. Modeli su povezani tako da se simulirana refleksija i propuštanje lista iz modela PROSPECT unose u model

SAIL, dopunjeni informacijama o optičkim svojstvima tla i geometriji osvjetljenja. Konačna izlazna veličina je refleksija krošnji. Princip proračuna shematski prikazuje Slika 18. Oznake sa slike su objašnjene u nastavku teksta.



Slika 18. Shematski prikaz proračuna refleksije krošnje koristeći povezane modele PROSPECT + SAIL (prerađeno prema (Berger et al., 2018.)). Oznake su objašnjene u tekstu.

Model optičkih svojstava listova **PROSPECT** simulira spektralni raspon od 400 do 2500 nm koristeći samo ograničeni broj parametara koji opisuju biofizička svojstva pojedinog lista. **PROSPECT** se temelji na Allenovom generaliziranom modelu ploča koji je mogao opisivati refleksiju i propuštanje listova uvođenjem indeksa šupljina za modeliranje različitih unutarnjih struktura različitih vrsta listova. Tijekom vremena je doživio nekoliko modifikacija. Prva verzija simulirala je refleksiju i propuštanje lista kao funkciju samo tri ulazna parametra:

- N - strukturalni indeks koji opisuje unutarnju strukturu lista. N je dimenzijski parametar koji opisuje složenost strukture lista, te utječe na način kako list raspršuje i apsorbira svjetlost. tipične vrijednosti su od 1 do 3. Niže vrijednosti imaju tanji listovi s jednostavnijom unutarnjom strukturom, a više vrijednosti deblji listovi s kompleksnom strukturom.
- C_{ab} [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] - koncentracije klorofila a + b koji su odgovorni za apsorpciju svjetlosti tijekom procesa fotosinteze i pretvorbi sunčeve energije u kemijsku energiju. Veća vrijednost ovog parametra znači da će i apsorpcija biti veća. Vrijednosti se kreću od 0 do 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$.
- C_w [g/cm^2] - sadržaja vode u listu izraženu kao debljina sloja vode po jedinici površine lista. To je jedan od ključnih biofizičkih parametara za simulaciju optičkih svojstava lista, a nama je važan zato što će u inverznom postupku ova vrijednost biti naša izlazna veličina koja određuje sadržaj vlage živog goriva. Ponekad se umjesto ove varijable koristi ekvivalentna debljina vode (engl. *EWT - Equivalent Water Thickness*) koja se iskazuje u [cm] i predstavlja visinu do koje bi voda lista dosegla ako bi bila ravnomjerno raspoređena na sloju čija je površina jednaka površini lista. Vrijednosti se kreću od 0,0001 do 0,036 g/cm^2 .

Novije verzije modela uključuju i dodatne parametre označene na Slici 16:

- C_m [g/cm^2] sadržaj suhe tvari lista ili kako se često naziva masa lista po jedinici površine (engl. *LMA - Leaf Mass per Area*). Vrijednosti se kreću od 0,0017 do 0,096 g/cm^2 .

- C_{bp} [frakcija] - smeđi pigmenti koji predstavljaju ne-fotosintetske pigmente koji se nakupljaju u biljnim listovima tijekom stresa, starenja ili oštećenja biljaka. Ti pigmenti apsorbiraju svjetlost u širokom dijelu vidljivog spektra i smanjuju refleksiju lista, što ima značajan utjecaj na ukupna optička svojstva. Izražava se kao frakcija ukupnog sadržaja pigmenta, udio smeđih pigmenta u odnosu na druge pigmente prisutne u listu. Vrijednosti se kreću od 0 do 1.
- C_{cx} [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] - ukupni sadržaj karotenoida, pigmentata koji igraju ključnu ulogu u fotosintezi i zaštiti biljaka od oksidativnog stresa uzrokovanog svjetlosnim zračenjem. Vrijednosti se kreću od 0 do $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

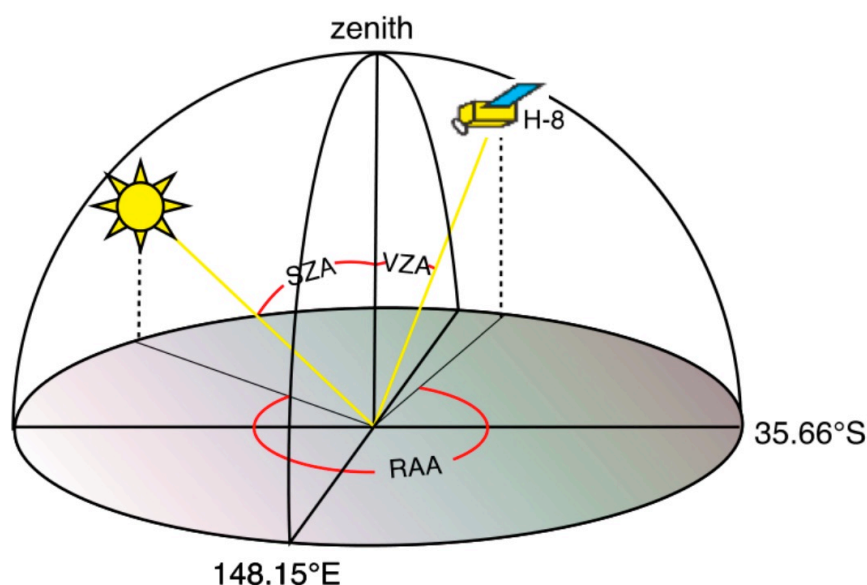
U novoj verziji modela iz 2017. nazvanoj **PROSPECT-D** dodan je i

- C_{anth} [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] - sadržaj antocijana, sekundarnih biljni metaboliti koji djeluju kao pigmenti, dajući crvenu, ljubičastu i plavu boju biljkama. Oni igraju važnu ulogu u zaštiti biljaka od stresa i oštećenja izazvanih svjetlosnim zračenjem, oksidacijom i drugim nepovoljnim uvjetima. Vrijednosti se kreću od 0 do $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

Inverzija PROSPECT-a je relativno jednostavna, ali iz perspektive daljinskih istraživanja inverzija spektra refleksije jednog lista ima ograničenu primjenu. Zbog toga je model PROSPECT povezan s modelom SAIL.

SAIL (engl. *Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves*) jedan je od najčešće korištenih modela refleksije krošnji i razvijen je kao proširenje jednodimenzionalnog modela usmjerene refleksije uvedenog još 1972. godine. Ulazni podaci modela SAIL su:

- Refleksiju i propuštanje svjetlosti kroz list (dobiveno iz PROSPECT-a).
- ALIA [$^{\circ}$] – srednji kut nagiba lista. Vrijednosti se kreću od 0 do 90° .
- Informacije o geometriji promatranja, tj. zenitnim kutovima Sunca i senzora (satelita) (SZA i OZA), te relativnom azimutalnom kutu između njih (RAA) (Slika 19.). Svi kutovi su u [$^{\circ}$].



Slika 19. Objašnjenje kutova geometrije promatranja SZA, OZA i RAA (Pampanoni, 2023.).

- ρ_{soil} [%] - spektralni odziv tla koji se odnosi na sposobnost tla da reflektira svjetlost u različitim spektralnim područjima. Ovo svojstvo tla igra ključnu ulogu u simulacijama

refleksije krošnje, jer reflektirana svjetlost tla može značajno doprinijeti ukupnom spektralnom odzivu, posebno kod rijetke vegetacije ili otvorenih krošnji.

- p_{soil} – parametar vlažnosti tla. Vrijednosti se kreću od 0 do 1.
- r_{soil} – parametar svjetline tla. Vrijednosti se kreću od 0 do 1.

U kasnijim verzijama uvedeni su parametri:

- LAI [m^2/m^2] - indeks površine lista ključan je biofizički parametar koji opisuje količinu lisne površine u odnosu na površinu tla. To je mjera gustoće krošnje i koristi se za modeliranje interakcije zračenja sa strukturama krošnji biljaka. Vrijednosti se kreću od 0,5 do 7 m^2/m^2 .
- LIDF [$^{\circ}$] – funkcija distribucije nagiba lista koja se uvodi umjesto ALIA i iskazuje s dvije veličine: LIDFa (prosječni nagib listova) i LIDFb (bimodalnost distribucije), koji se definiraju za različite funkcije distribucije. Ako je poznat samo prosječni kut nagiba, LIDFa se postavlja na 0, a LIDFb izjednačava s ALIA.
- Hot [m/m] - omjer veličine listova (širine) i visine krošnje. Vrijednosti se kreću od 0,01 do 0,40 m/m .

Godine 2001. SAIL je dodatno unaprijeđen dodatkom geometrijskog modela **GEO** kojim se modelira diskontinuirana vegetacije ponderiranjem refleksije i propuštanja svjetlosti u odnosu na način na koji su modelirana stabla vrlo jednostavnih oblika (npr. cilindri, stošci), jednoliko raspoređena po ravnoj površini. Uključeni su dodatni ulazni parametri:

- chw - omjer visine i širine krošnji. Vrijednosti se kreću od 1 do 3.
- ccov – pokrov krošnji (kod određivanja parametara goriva krošnji označava se sa CC – Crown Cover. Vrijednosti se kreću od 0.2 do 1.
- cshp – oblik krošnji. Na raspolaganju su dva oblika stožac (engl. *Cone*) i valjak (engl. *Cylinder*).

Model SAIL pruža opis krošnje lista, ali inverzija na temelju satelitskih podataka izvediva je samo kada je dostupno nekoliko mjerenja iz različitih kutova promatranja, što gotovo nikada nije slučaj. Da bi se riješio taj problem, dva modela su spojena u **PROSAIL** početkom devedesetih, a njihova paralelna evolucija omogućila je stvaranje različitih verzija kroz zajednička proširenja. Python implementacija PROSAIL-a može se pronaći na Zenodo platformi (Domenzain et al., 2019.).

Dodatkom programa GEO nastao je **PROGEOSAIL** koji omogućava i modeliranje diskontinuirane vegetacije. Python implementacija PROGEOSAIL-a, nastala u okviru rada na doktorskoj tezi Valeria Pampanoni, jednog od istraživača na projektu FirEURisk (Pampanoni, 2023.) može se pronaći na GitHub platformi (Pampanoni, 2023.). PROGEOSAIL model izračunava bidirekcijsku refleksiju krošnji u rasponu od 400 do 2500 nm s inkrementima od 1 nm, kao funkciju do minimalno 15 ulaznih parametara koji definiraju sadržaj pigmentata i vode, arhitekturu krošnje, pozadinu tla, hot-spot, difuznost sunčevog zračenja i geometriju promatranja.

Za proračun sadržaja vlage živih goriva bitan je inverzni postupak. Među varijablama modela PROSPECT nalaze se koncentracija vode lista C_w i sadržaj suhe tvari lista C_m . C_w predstavlja količinu vode u listu po jedinici površine izraženu u g/cm^2 i ponekad se miješa s ekvivalentnom debljinom vode (EWT).

$$C_w \left[\frac{g}{cm^2} \right] = EWT [cm] * \rho_w \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (59)$$

gdje je ρ_w gustoća vode. Ako pretpostavimo gustoću vode $\rho_w = 1 g/cm^3$, ove dvije varijable imaju iste vrijednosti, što opravdava njihovo miješanje, ali su im jedinice drugačije.

Sadržaj vlage živog goriva (LFMC) može se izračunati dijeljenjem ove dvije biofizičke varijable. Neka je suha težina lista označena s DW, a težina vode s WW. Po definiciji, LFMC je omjer mase vode sadržane u listu i suhe težine lista:

$$LFMC = 100 * \frac{WW}{DW} \quad (60)$$

Dijeljenjem i brojitelja i nazivnika površinom lista A, dobivamo definicije dviju spomenutih varijabli:

$$LFMC = 100 * \frac{WW/A}{DW/A} = 100 * \frac{C_w}{C_m} \quad (61)$$

Jednadžba (61) pokazuje da LFMC možemo procijeniti inverzijom modela PROSPECT, ali samo ako ove varijable dvije varijable imaju značajan utjecaj na izlazne vrijednosti modela, tj. da njihove varijacije imaju važnu ulogu u određivanju intenziteta izmjerenog zračenja. U okviru projekta FirEURisk istraživači sa Sapienza Università di Roma, Italija (Pamploni et al., 2022.) napravili su iscrpnu analizu osjetljivosti i to dokazali da varijacije koncentracije vode lista C_w znatno utječu na izlazne rezultate, posebno na valnim duljinama većim od 1200 nm. Utjecaj varijable C_m je znatno manji, pa je i teže procijeniti njegovu vrijednost inverzijom.

U okviru FirEURisk projekta kod proračuna sadržaja vlage živog goriva inverzijom odabran je postupak temeljen na **tablicama za pretraživanje vrijednosti** (engl. LUT – Look-up Table). Inverzni postupak temeljen na **LUT algoritmu** koristi prethodno generiranu tablicu koja povezuje različite kombinacije biofizičkih varijabli, u našem slučaju koncentracija vode lista C_w i sadržaj suhe tvari lista C_m iz čega se računa sadržaj vlage živih goriva (LFMC) s odgovarajućim spektralnim refleksijama ili indeksima. Ova metoda omogućava brzo i precizno procjenjivanje LFMC-a iz satelitskih podataka uspoređivanjem izmjerenih spektralnih vrijednosti s prethodno simuliranim vrijednostima.

Ulazni podaci za LUT algoritam:

1. Satelitski podaci:
 - Sentinel-2: Visokorezolucijske slike (10 m) koje sadrže spektralne informacije u vidljivom (VIS), blisko-infracrvenom (NIR) i kratkovalnom infracrvenom (SWIR) području.
 - Sentinel-3: Podaci srednje rezolucije (300 m) sličnih spektralnih opsega, ali pokrivaju veće prostore s manje detalja.
2. Model prijenosa zračenja (PROGEOSAIL)
 - Generiraju simulirane refleksije za različite vrijednosti biofizičkih parametre (npr. LAI, C_w , C_m) povezanih sa LFMC.
 - Simulacije obuhvaćaju različite uvjete osvjetljenja, kutove gledanja i indekse vegetacije.
3. Inicijalni rasponi varijabli – za sve varijable inicijalni rasponi varijabli su definirani unaprijed spomenuti kod opisa varijabli, npr. za C_w vrijednosti se kreću od 0,0001 do 0,036 g/cm².
4. Izmjerene spektralne refleksije – dobivaju se za svaki piksel iz satelitskih slika u relevantnim spektralnim opsezima.

Kako radi LUT algoritam?

1. Generiranje LUT tablice:

- Modeli prijenosa zračenja (PROGEOSAIL) koriste se za simulaciju refleksija krošnji na temelju kombinacija ulaznih biofizičkih varijabli.
- LUT tablica s je višedimenzionalni skup podataka koji sadrži unaprijed simulirane kombinacije varijabli i pripadajuće spektralne refleksije. Primjer izgleda LUT tablice prikazuje Tablica 13.

Tablica 13. Primjer izgleda LUT tablice s izračunatim refleksijama na valnim duljinama Sentinel 2 satelita.

biofizičke varijable				izračunata refleksija modelom PROGEOSAIL		
C_w [g/cm ²]	C_m [g/cm ²]	...	LFMC (%)	kanal 2 490 nm	kanal 3 560 nm	...
0,01	0.008		125	0.25	0.48	
0,01	0.01		100	0.22	0.52	
0,01	0.02		50	0.18	0.55	

- Važno je naglasiti da SAIL ovisi o geometriji promatranja (Slika 19.) pa je LUT potrebno ponovo računati za svaki prolaz satelita.

2. Usporedba podataka:

- Spektralne refleksije izmjerene sa Sentinel-2/3 satelitima uspoređuju se s LUT tablicom. Istraživanje (Pampanoni, 2023.) je pokazalo da se kod oba satelita najbolje koristiti sedam kanala prikazanih u Tablici 14.

Tablica 14. Pogodni kanali satelita Sentinel-2/3 za proračun sadržaja vlage živog goriva metodom inverzije (Pampanoni, 2023.).

satelit	kanal	centralna valna duljina [nm]	opis	rezolucija [m]
Sentinel-2 S2MSI2A	2	490	B - plava	10
	3	560	G - zelena	10
	4	665	R - crvena	10
	7	783	vegetacijska rubna crvena	20
	8	842	NIR – blizu infra-crvenog	10
	11	1610	SWIR – kratko-valna IR	20
	12	2190	SWIR - kratko-valna IR	20
Sentinel-3 SY_2_SYN	Oa04/SYN04	490	B - plava	300
	Oa06/SYN06	560	G - zelena	300
	Oa08/SYN08	665	R - crvena	300
	Oa16/SYN13	778.75	vegetacijska rubna crvena	300
	Oa17/SYN14	865	NIR – blizu infra-crvenog	300
	S5N/SYN20	1610	SWIR – kratko-valna IR	500
	S6N/SYN21	2250	SWIR - kratko-valna IR	500

- Inverzija se temelji na traženju najbolje podudarnosti između izmjerenih i simuliranih spektralnih refleksija.
- Najbolja podudarnost se određuje primjenom odgovarajuće funkcije pogreške. Quan i suradnici (Quan et al., 2021.) su testirali čak 12 različitih funkcija pogreške,

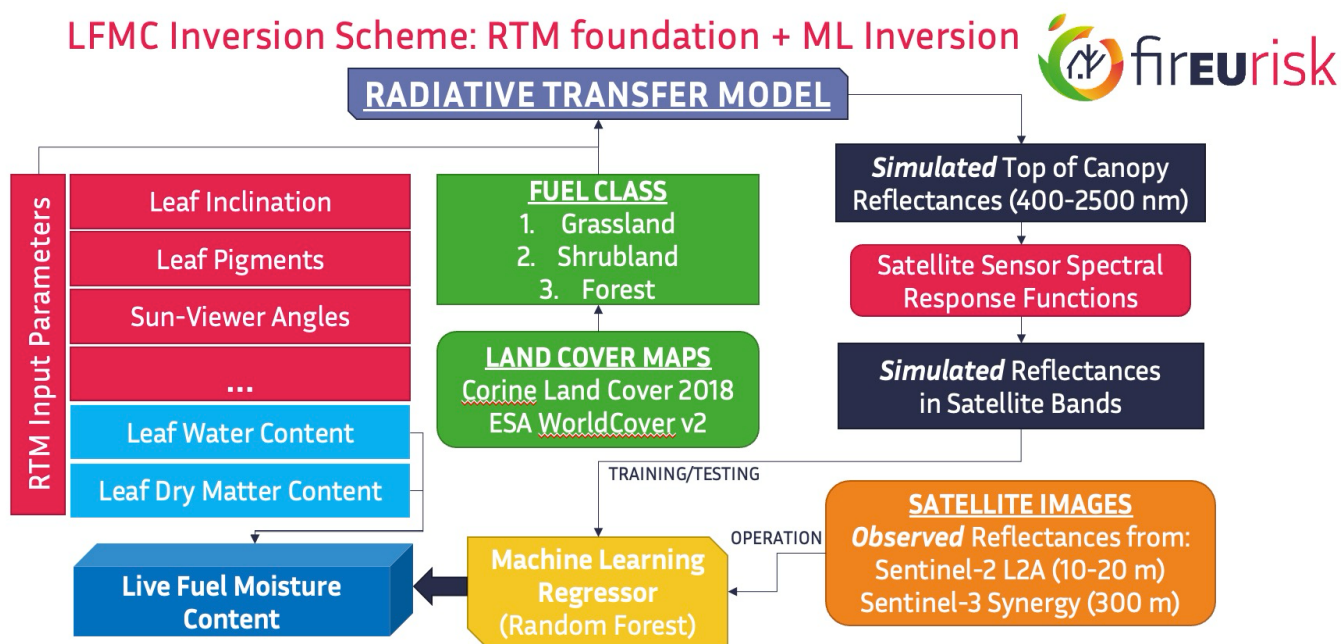
Pampanoni (Pampanoni, 2023.) je testirao tri i pokazao da najbolje rezultate tijekom validacije na podacima iz Portugala (Luisa) i Sardinije (Capo Caccia) daje **funkcija korijena srednje kvadratne pogreške** (engl. *RMSE - Root Mean Square Error Function*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - w_i)^2}{n}} \quad (62)$$

gdje je v_i izmjerena spektralna refleksija u kanalu i , w_i simulirana spremljena u LUT tablici, a n broj satelitskih kanala koji se koriste.

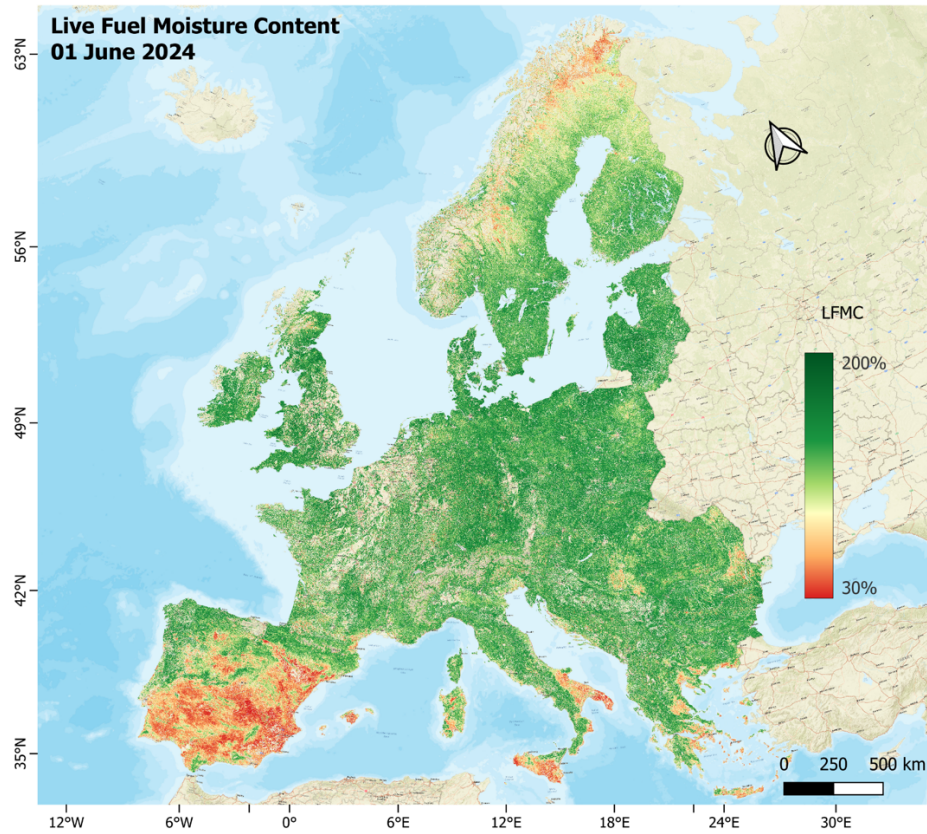
- Kod usporedbe satelitskih podataka s LUT tablicom iz tablice se uzima N najboljih rezultata. Istraživanja su pokazala da se ne dobije bitno veća točnost ako se uzme više od 20 rezultata, pa je uzeto $N = 20$ (Pampanoni, 2023.).
- Zadnji korak je određivanje reprezentativne vrijednosti (središnje tendencije) koja će predstavljati N najboljih rezultata. Quan i suradnici (Quan et al., 2021.) su testirali 5 različitih mjera središnje tendencije, Pampanoni (Pampanoni, 2023.) je od toga izabrao 2 (srednji vrijednost i medijanu) i pokazao da najbolje rezultate u usporedbi s validacijskim podacima daje medijana.

Slika 20. prikazuje shemu LUT algoritma.

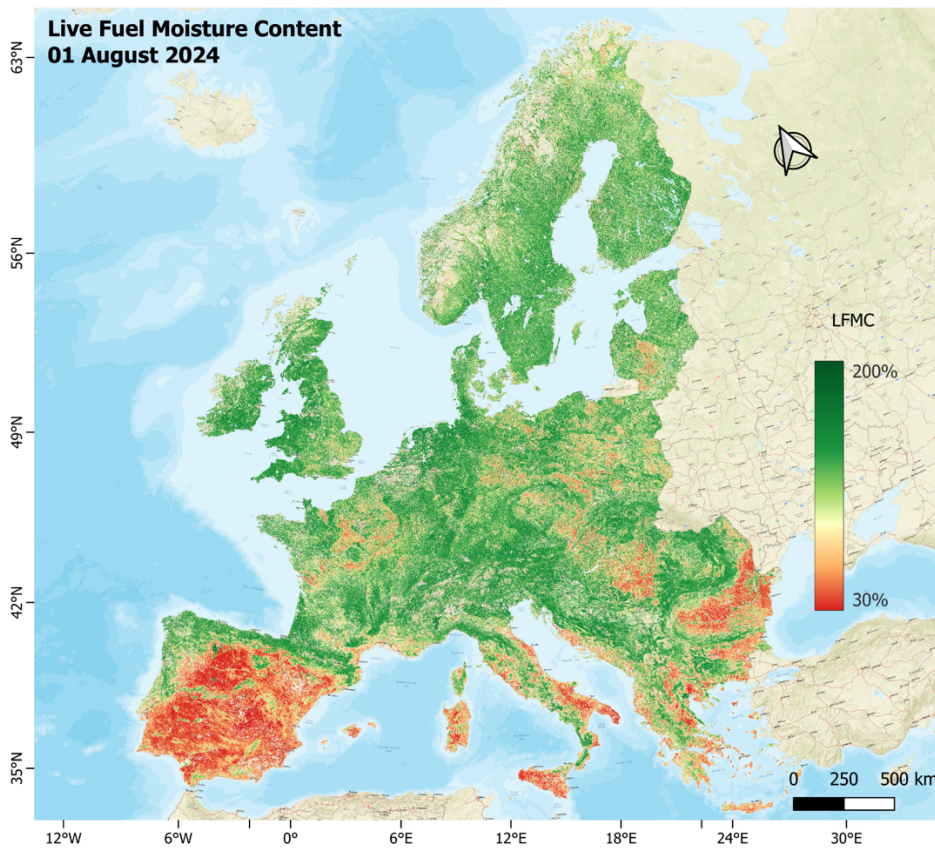


Slika 20. Shema FirEUrisk LUT algoritma (Pampanoni, 2024.).

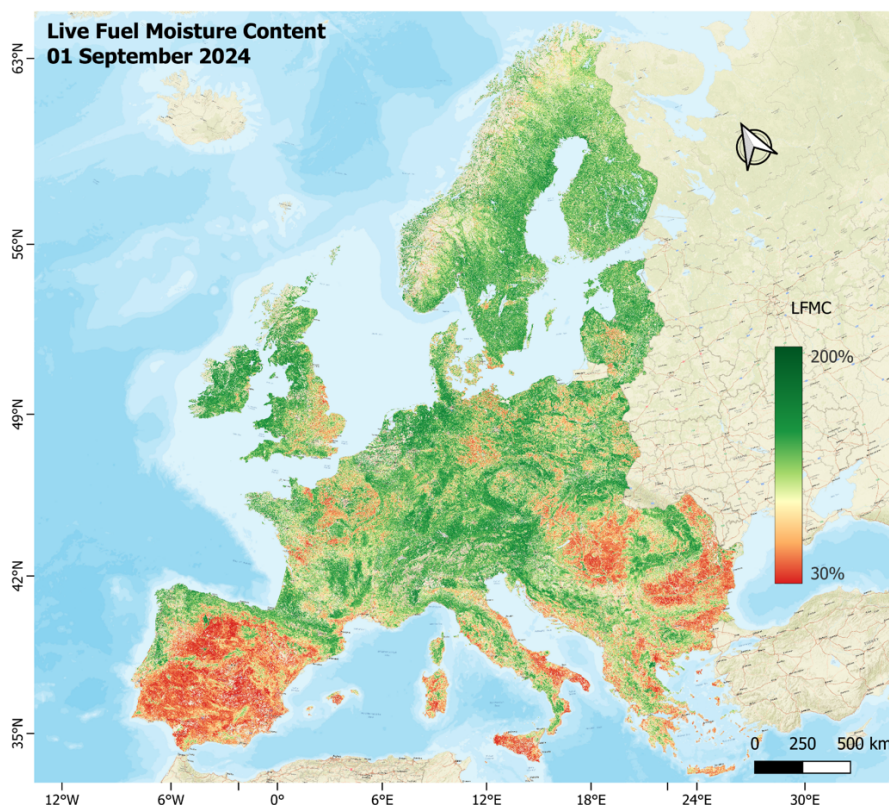
Konačni rezultat ovog postupka je dnevni proračun sadržaja vlage živog goriva korištenjem satelita Sentinel 3 u rezoluciji od 300 m za područje cijele Europe. Slike 21. – 23. prikazuju sadržaj vlage na dan 1.06.2024.g., 1.08.2024.g. i 1.09.2024.g. (Pampanoni, 2024.).



Slika 21. Sadržaja vlage živog goriva za područje Europe u rezoluciji 1 k na dan 1.06.2024.g.



Slika 20. Sadržaja vlage živog goriva za područje Europe u rezoluciji 1 k na dan 1.08.2024.g.



Slika 20. Sadržaja vlage živog goriva za područje Europe u rezoluciji 1 km na dan 1.09.2024.g.

Osnovni nedostatak ovog postupka je dosta kompleksan postupak proračuna za izradu LUT tablica, posebno što tablice trebaju računati za svaki novi prolazak satelita zato što model SAIL ovisi o geometriji promatranja (Slika 17.). Iako se u okviru projekta FirEURisk eksperimentalno računao na dnevnoj razini za područje cijele Europe, njegova primjena na dnevnoj operativnoj razini za sada još nije prihvatljiva.

4.3.3. Sadržaja vlage živih goriva za FirEURisk demonstracijsko područje DA20 (Splitsko-dalmatinska županija) na temelju satelitskih slika i modela prijenosa zračenja za 2024.g.

Dio aktivnosti projekta FirEURisk je i demonstracija pojedinih postupaka na razini Europe u rezoluciji 1 km, pilot područja (PS) u rezoluciji 100 m i demonstracijskih područja u što većoj rezoluciji, po mogućnosti 10 m².

Zahvaljujući **Valeriu Pampanoni** sa Sapienza Università di Roma, Italija za demonstracijsko područje DA20 (Splitsko-dalmatinska županija) izračunat je sadržaj vlage živih goriva u rezoluciji 10m za cijelu 2024.g. Korišteni su podaci as satelita Sentinel-2. Slika 21 prikazuje segmenti satelitskih snimaka (33TWJ, 33TWH, 33TXJ, 33TXH - Relative Orbit Number 79) koje satelit Sentinel-2 snima tijekom svoje putanje na području Splitsko-dalmatinske županije.

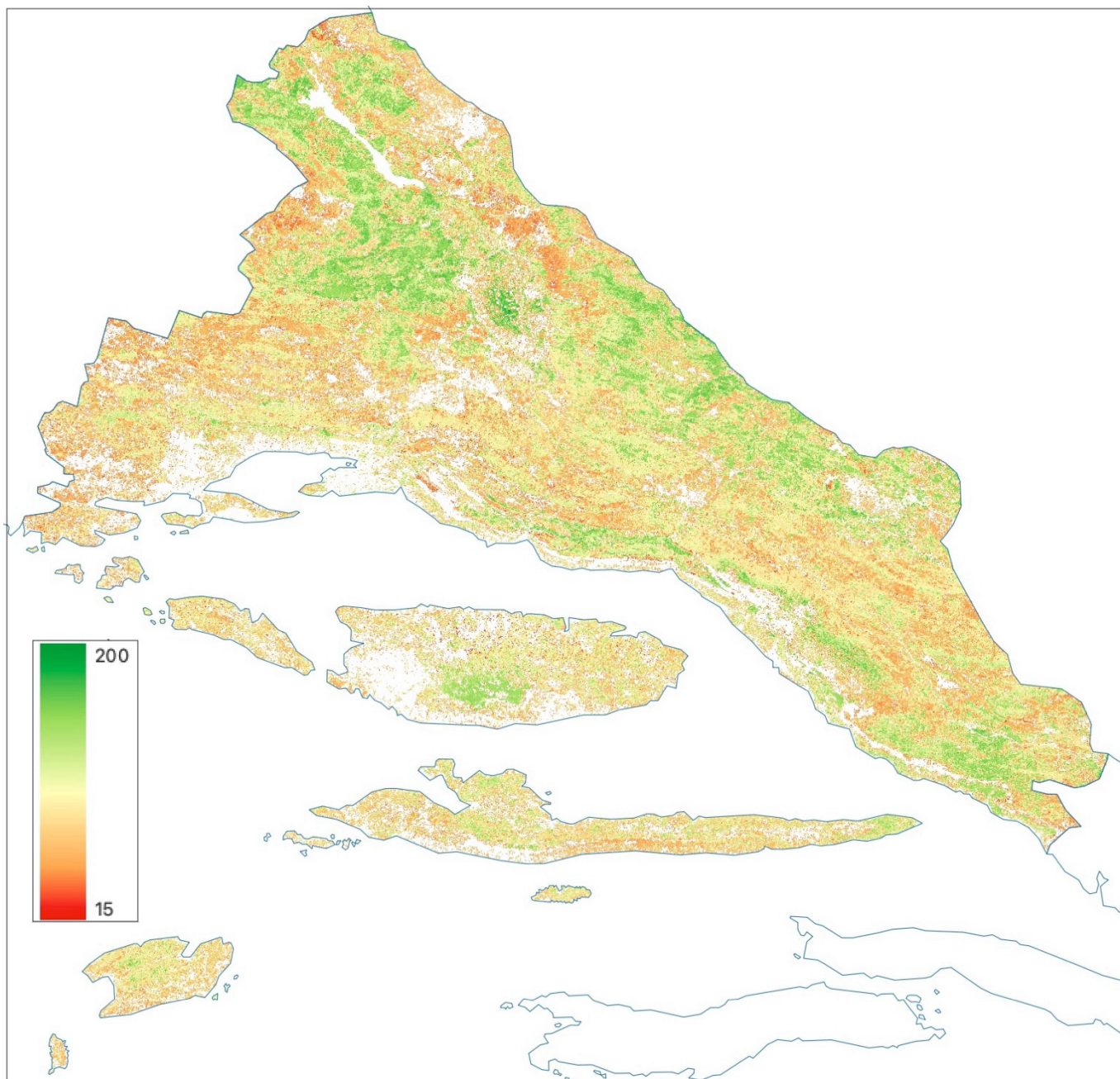
² Popis FirEURisk pilot područja (PS) i demonstracijskih područja (DA) se nalazi na: <https://fireurisk.eu/pilot-sites/>



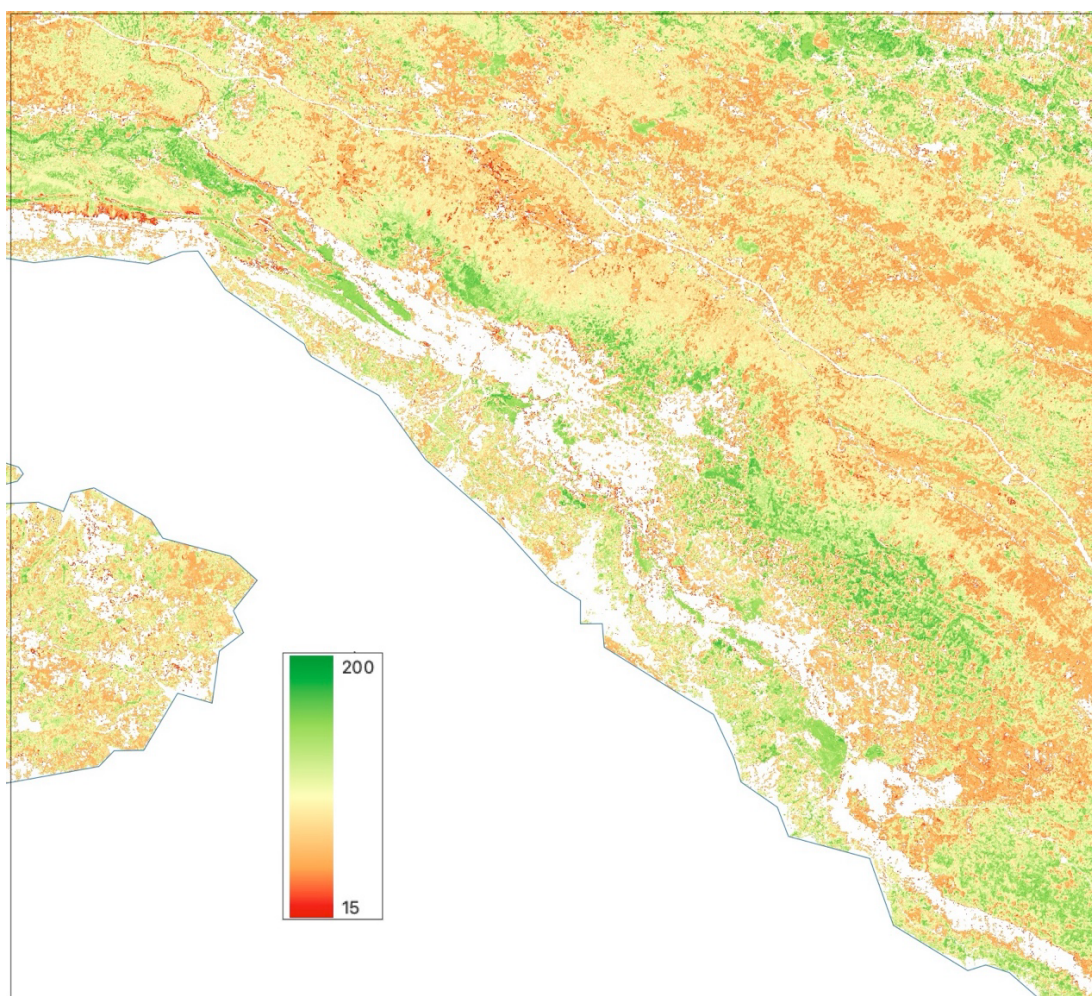
Slika 21. Segmenti satelitskih snimaka (33TWJ, 33TWH, 33TXJ, 33TXH) koje satelit Sentinel-2 snima tijekom svoje putanje na području Splitsko-dalmatinske županije.

Sadržaj vlage živih goriva je računat opisanim postupkom modela prijenosa zračenja korištenjem najnoviji pikseli bez oblaka iz svih opažanja unutar vremenskog okvira od 6 dana. Vremenska rezolucija dobivenih karata je svakih 5 dana.

U požarnoj sezoni 2024. posebno teško razdoblje je bilo krajem srpnja i početkom kolovoza kada je na području Dalmacije istovremeno gorilo nekoliko velikih požara. 30. srpnja 2024. izbio je veliki požar na području Tučepa koji se brzo širio potpomognut jakim vjetrom. Slijedećih nekoliko dana planulo je još nekoliko velikih požara. Zanimalo nas je kakav je u to vrijeme bio sadržaj vlage živih goriva. Slika 22. prikazuje sadržaj vlage živih goriva 30.07.2024.g. za područje Splitsko-dalmatinske županije, a Slika 23. za područje Tučepa.

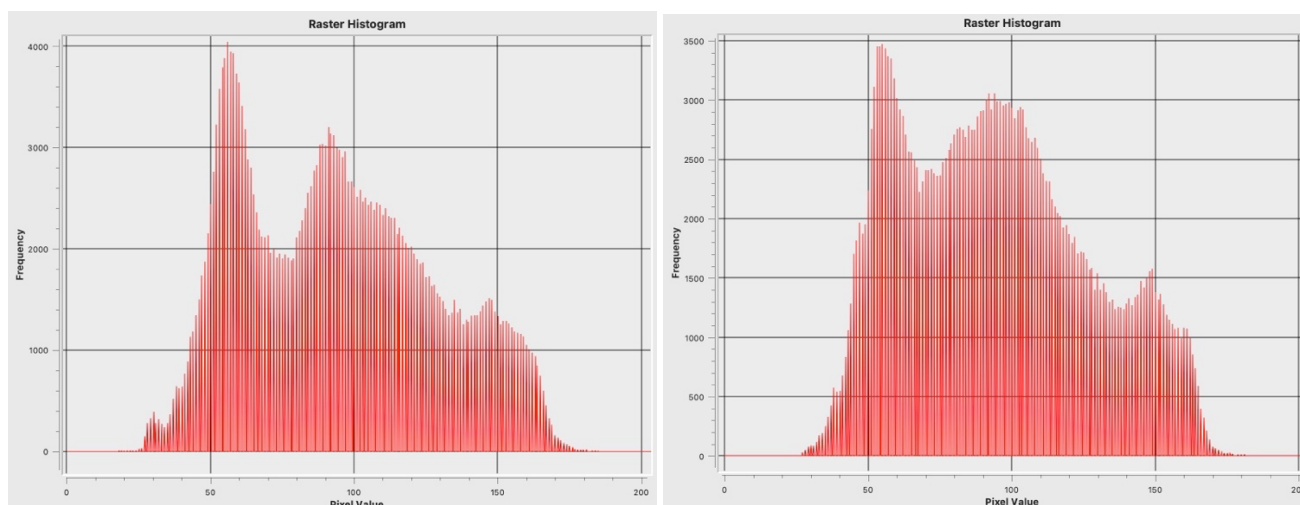


Slika 22. Sadržaj vlage živih goriva (%) 30.07.2024.g. za područje Splitsko-dalmatinske županije.



Slika 23. Sadržaj vlage živih goriva 30.07.2024.g. za područje Tučepa.

Na području Splitsko-dalmatinske županije 30.07. minimalna vrijednost sadržaja vlage živih goriva je bila 11%, maksimalna 190%, a srednja vrijednost 94%. Histogram prikazuje Slika 24. za 30.07. (lijevo) i 4.08. (desno) iz čega je vidljivo da se slično vrijeme zadržalo i sljedećih dana. 4.08. minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti se nisu promijenile. Na histogramima je posebno zanimljiv skok sadržaja vlage oko 50 – 60%. Prema Scott-Burganovim scenarijima vlažnosti ovo bi spadalo u scenarij L1 – vrlo mali sadržaj vlage.



Slika 24. Histogram sadržaja vlage živih goriva 30.07.2024.g. (lijevo) i 4.08.2024. za područje Splitsko-dalmatinske županije.

Ovi podaci o sadržaju vlage živih godina za cijelu 2024.g. na području Splitsko-dalmatinske županije koristiti će se kod analize požarnog rizika i korelacije s drugim načinima određivanja sadržaja vlage živih goriva.

4.4. Zaključak vezan uz određivanje sadržaja vlage živog goriva (LFMC)

U ovom poglavlju opisano je nekoliko postupaka za određivanje sadržaja vlage živih goriva podijeljenih u tri osnovne skupine:

1. Postupci određivanja sadržaja vlage živih goriva korištenje scenarija vlažnosti i tablica za jednostavnu, ali grubu estimaciju sadržaja vlage živih goriva.
2. Postupci određivanja sadržaja vlage živih goriva korištenjem meteoroloških podataka.
3. Postupci određivanja sadržaja vlage živih goriva daljinskim istraživanjima analizom satelitskih slika.

Konačni cilj je formiranje karte s prostornom raspodjelom sadržaja vlage živih goriva za potrebe računanja propagacijskog potencijala koji je jedan od ulaza za proračun požarnog rizika.

Sadržaj vlage živih goriva je veličina na koju ne utječu samo meteorološki podaci, već i brzini unosa vode kroz korijenje i gubitka vode transpiracijom, a kako su obje brzine kontrolirane različitim fizičkim i biološkim varijablama, točna procjena vlage živog goriva mnogo je puno teža nego kod mrtvog goriva koje ovisi samo o termodinamičkim procesima.

Problemom proračuna sadržaja vlage živih goriva bavilo se i bavi puno različitih istraživača. Nakon detaljne analize nekoliko postupaka, prije svega u odnosu na mogućnost njihove praktične svakodnevne primjene u sustavima za predviđanje požarnog rizika, smatramo da, za sada, prednost još uvijek imaju jednostavnije metode. Smatramo da bi paralelno sadržaj vlage živog goriva trebalo računati na tri načina:

1. Jednostavnim postupkom iz 2005.g. temeljene na Scott-Burgan **scenarijima vlažnosti goriva**. Scenariji vlažnosti možda daju grubu aproksimaciju, ali ih jednostavnost primjene čini prihvatljivijim u odnosu na točnije, ali računski vrlo zahtjevne postupke.
2. Meteorološki utemeljenom postupku na **indeksu vegetacijske sezone**.
3. Jednostavnijim postupkom satelitskog daljinskog istraživanja temeljenom na **vidljivom atmosferskom otpornom indeksu** kojeg bi trebalo kalibrirati za područje Europe i Hrvatske s obzirom da je u originalnom istraživanju kalibriran samo za područje jugoistočne Australije.

Od tri rezultata trebalo bi uzeti najmanji iznos sadržaja vlage, zbog toga što je bolje požarni rizik precijeniti, nego podcijeniti.

Zaključak

Ovaj dokument je nastao na temelju istraživanja provedenih u Radnom paketu 1 projekta FirEUrisk Zadatku 1.1. posvećenom procjeni rizika od požara, aktivnosti 1.1.1. **Fire weather and fuel status prevention** koja se bavila analizom vremenskih uvjeta i stanja goriva. U okviru ovih istraživanja partneri iz **Technische Universität Dresden (TUD)**, Njemačka i **Sapienza Università di Roma**, Italija bili su zaduženi za proračun sadržaja vlage živog goriva, a partneri iz **Meteogrid SL**, Španjolska za proračun sadržaja vlage mrtvog goriva.

Paralelno s tim aktivnostima istraživači s FESB-a, koji je bio zadužen za proračun propagacijskog potencijala požara, proveli su istraživanje na razini demonstracijskog područja (DA) Splitsko-dalmatinske županije kako bi potvrdili najpovoljniji način određivanja sadržaja vlage mrtvog goriva kod proračuna propagacijskog potencijala požara.

Izveštaj je posvećen postupcima proračuna sadržaja vlage mrtvog goriva i to svih gorivih kategorija (1h, 10h, 100h) na temelju meteoroloških podataka, te postupcima estimacije sadržaja vlage živog goriva (zeljastog, drvenastog i goriva u krošnjama) na temelju analize satelitskih slika, ali i nekim drugim jednostavnijim postupcima pomoću kojih je moguće dobiti karte s prostornom raspodjelom podataka o sadržaju vlage goriva.

Analizirano je nekoliko različitih modela za proračun sadržaja vlage mrtvih goriva, od jednostavnih modela temeljenih na korištenju tablica (BFMC tablica), do modela temeljenim na fizikalnim procesima (Nelsonov model). Svi modeli su i testirani na podacima povijesnih požara na područji FirEUrisk demonstracijskog područja (Splitsko-dalmatinska županija). Konačan zaključak je da BFMC tablice bez korekcije daju, barem statistički, najbolji rezultat u procjeni propagacijskog potencijala, jer je u procjeni propagacijskog potencijala bolje precijeniti opasnost od širenja požara nego je podcijeniti. Stoga preferiramo niže vrijednosti vlage mrtvog goriva. BFMC tablice ne samo da daju najmanju medijalnu vrijednost, već i prilično uzak i simetričan okvir između 1. i 3. kvartila (25. i 75. percentil), kao i vrlo bliske i simetrične gornje i donje granične vrijednosti. Kao prihvatljiva zamjena može se koristiti i korigirani Cohen & Deemingov model, koji možda ima i određenu prednost, zato što daje kontinuirane vrijednosti za cijeli raspon promjene relativne vlažnosti zraka, a ne skokovite promjene kakve daju BFMC tablice. Na trećem mjestu bi bio korigirani Nelsonov model ima višu medijalnu vrijednost, ali su karakteristike njegovog okvira kod originalnog modela najbliže BFMC tablicama.

BFMC tablice daju sadržaj vlage finog goriva (m1h), a Cohen & Deeming model sadržaj vlage finog (m1h) i srednjeg (m10h) goriva. Ako se koriste BFMC tablice za određivanje ostalih kategorija (m10h, m100h), umjesto originalnih jednadžbi koje zahtijevaju određivanje sadržaja vlage dva puta dnevno predlažemo korištenje jednostavnijih Scott-Burgan scenarija vlažnosti koji daju $d_{10h} = d_{1h} + 1$ (%) i $d_{100h} = d_{1h} + 2$ (%). Slično je i kod ostalih modela.

Sadržaj vlage živih goriva je veličina na koju ne utječu samo meteorološki podaci, već i brzini unosa vode kroz korijenje i gubitka vode transpiracijom, a kako su obje brzine kontrolirane različitim fizičkim i biološkim varijablama, točna procjena vlage živog goriva mnogo je puno teža nego kod mrtvog goriva koje ovisi samo o termodinamičkim procesima.

Problemom proračuna sadržaja vlage živih goriva bavilo se i bavi puno različitih istraživača. Nakon detaljne analize nekoliko postupaka, prije svega u odnosu na mogućnost njihove praktične svakodnevne primjene u sustavima za predviđanje požarnog rizika, smatramo da, za sada, prednost još uvijek imaju jednostavnije metode. Smatramo da bi paralelno sadržaj vlage živog goriva trebalo računati na tri načina:

1. Jednostavnim postupkom iz 2005.g. temeljene na Scott-Burgan scenarijima vlažnosti goriva. Scenariji vlažnosti možda daju grubu aproksimaciju, ali ih jednostavnost primjene čini prihvatljivijim u odnosu na točnije, ali računski vrlo zahtjevne postupke.
2. Meteorološki utemeljenom postupku na indeksu vegetacijske sezone.
3. Jednostavnijim postupkom satelitskog daljinskog istraživanja temeljenom na vidljivom atmosferskom otpornom indeksu kojeg bi trebalo kalibrirati za područje Europe i Hrvatske s obzirom da je u originalnom istraživanju kalibriran samo za područje jugoistočne Australije.

Od tri rezultata trebalo bi uzeti najmanji iznos sadržaja vlage, zbog toga što je bolje požarni rizik precijeniti, nego podcijeniti.

Sadržaji vlage su dinamički podaci koji se stalno mijenjaju, pa je za procjenu rizika od požara i simulaciju širenja požara nužno kontinuirano procijeniti njihove vrijednosti. Nadamo se da će ovaj diseminacijski izvještaj projekta FirEUrisk potaknuti pokretanje servisa koje bi ove veličine, važne za protupožarnu zaštitu, određivao kontinuirano na dnevnoj osnovi.

7. Literatura

- (Alcasena et al, 2023.) Fermín Alcasena, Elena Aragoneses, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia, (2023.) D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modelling process, FirEUrisk Report, 2023.
- (Bakšić et al., 2017.) Bakšić, N.; Bakšić, D.; Jazbec, A. (2017.) Hourly fine fuel moisture model for *Pinus halepensis* (Mill.) litter, *Agricultural and forest meteorology*, 243, 93-99
- (Bakšić & Bakšić, 2022.) Bakšić, Nera; Bakšić, Darko, Predicting the fine fuel moisture content in Dalmatian black pine needle litter, *International journal of wildland fire*, 31 (2022), 708-719
- (Berger et al., 2018.) Berger, K., Atzberger, C., Danner, M., D’Urso, G., Mauser, W., Vuolo, F., & Hank, T. (2018). Evaluation of the PROSAIL Model Capabilities for Future Hyperspectral Model Environments: A Review Study. *Remote Sensing*, 10(1), 85. <https://doi.org/10.3390/rs10010085>
- (Caccamo et al., 2012) Caccamo, G., L. A. Chisholm, R. A. Bradstock, M. L. Puotinen, and B. G. Phippen (2012), Monitoring live fuel moisture content of heathland, shrubland and sclerophyll forest in south-eastern Australia using MODIS data, *Int. J. Wildland Fire*, 21(3), 257–269. - <https://www.publish.csiro.au/WF/WF11024>
- (Cohen & Deeming, 1985.) Cohen, J.D.; Deeming, J.E. (1985) The National Fire-Danger Rating System: Basic Equations; *General Technical Report PSW-82; USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station*: Berkeley, CA, USA, 1985; p. 23.
- (Dimitrakopoulos et al., 2011.) Dimitrakopoulos, A.P., Bemmerzouk, A.M. and Mitsopoulos, I.D. (2011.) Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment, *Meteorol. Appl.* 18: 83 – 93 (2011.) - <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.214/pdf>
- (Domenzain et al., 2019.) Domenzain, L.M., Gómez-Dans, J. & Professor Lewis, P. (2019). *jgomezdans/prosail: Pip package bug fix release (2.0.3)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2574925>
- (EFFIS, 2024.) EFFIS - European Forest Fire Information System - <https://effis.jrc.ec.europa.eu>
- (ERA5, 2024.) ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present - <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>
- (Forkel et al., 2023.) Forkel, M., Schmidt, L., Zotta, R.-M., Dorigo, W., and Yebra, M.: Estimating leaf moisture content at global scale from passive microwave satellite observations of vegetation optical depth, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27, 39–68, 2023, <https://doi.org/10.5194/hess-27-39-2023>
- (Fosberg & Deeming, 1971.) Fosberg, M. A. and Deeming, John E. (1971.) Derivation of the 1- and 10-hour timelag fuel moisture calculations for fire-danger rating, *Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture*, 1971.
- (FirEUrisk, 2022.) H2020 FirEUrisk project - <https://FirEUrisk.eu> (posjećeno 19.01.2025.).
- (Jolly, 2016.) Jolly, W. Matt (2016) SimpleFFMC: Fine Dead Fuel Moisture Tables, *USFS, RMRS, Missoula Fire Sciences Laboratory*, 2016,

https://ccmedia.fdacs.gov/content/download/71353/file/SimpleFFMC_Tables_01Sept2016.pdf
on-line kalkulator: <https://www.wfas.net/ffmc/>

- (Jolly, 2018.) (Jolly, 2018) W. Matt Jolly, Overview of NFDRS2016, USFS, RMRS, MISSOULA FIRE SCIENCES LABORATORY NATIONAL NFDRS 2016 ROLLOUT WORKSHOP 28 APR 2018 (presentation) - https://gacc.nifc.gov/eacc/predictive_services/fuels_fire-danger/documents/Overview%20of%20NFDRS2016%20and%20Implementation%20and%20Evaluation.pdf
- (Jolly et al., 2005.) Jolly, W.M., Nemani, R., Running, S.W., (2005.) A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biology* 11, 619-632. <https://doi:10.1111/j.1365-2486.2005.00930.x>
- (Lewrance, 2005.) Mark G. Lawrence, The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications, *Bulletin of the American Meteorological Society* 86(2) (01 Feb 2005)
- (Nelson, 2000.) Nelson Jr, Ralph M. (2000.) Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content, *Can. J. of Forest Research*, Vol 30, No 7, pp. 1071-1087 July 2000. <https://columbiaweather.com/RPViewDoc.pdf>
- (Nolan et al., 2016.) Nolan, R. H., V. Resco de Dios, M. M. Boer, G. Caccamo, M. L. Goulden, and R. A. Bradstock (2016.), Predicting dead fine fuel moisture at regional scales using vapour pressure deficit from MODIS and gridded weather data, *Remote Sens. Environ.*, 174, 2016, pp. 100– 108
- (Nolan et al., 2016b) Nolan, R. H., Boer, M. M. , Resco de Dios, V. , Caccamo, G. , Bradstock, R. A., (2016) Large-scale, dynamic transformations in fuel moisture drive wildfire activity across southeastern Australia, *Geophysical Research Letters*, Vol.43, Issue 9, 2016, pp.4229 – 4238 - <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016GL068614>
- (Pampanoni et al., 2022.) Pampanoni, V., Laneve, G., Santilli, G. (2022.) Evaluating Sentinel-3 Viability for Vegetation Canopy Monitoring and Fuel Moisture Content Estimation, IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 17-22 July 2022, <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9884150>
- (Pampanoni et al., 2023.) Pampanoni, V., Laneve, G., Viegas, D.X., Alves, D., Ribeiro, L. M., Pellizzaro, G., Bacciu, V., Ventura, A. (2023.) Early Validation of a Live Fuel Moisture Content Product based on Sentinel-2 and Sentinel-3 Images, in IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2023.
- (Pampanoni, 2023.) Pampanoni, V., (2023.) A scalable fire danger index based on sentinel imagery, PhD Thesis, Università degli Studi di Roma „La Sapienza“, <https://hdl.handle.net/11573/1666953> – PROGEOSAIL Python implementacija <https://github.com/valpamp/progeosail>
- (Pampanoni, 2024.) Pampanoni, V. (2024.) Live Fuel Moisture Content, Presentation at FirEUrisk ET Demonstration Day, 16.09.2024.
- (Pettinari & Chuvieco, 2017) M. Lucrecia Pettinari and Emilio Chuvieco, Fire Behavior Simulation from Global Fuel and Climatic Information, *Forests* 2017, 8, 179 - <https://www.mdpi.com/1999-4907/8/6/179>
- (Quan et al., 2021.) Quan, X., Yebra, M., Riaño, D., He, B., Lai, G. and Liu, X. (2021) *Global fuel moisture content mapping from MODIS*, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101 (2021), p. 102354.

- (Resco de Dios et al., 2015.) Resco de Dios, V., A. W. Fellows, R. H. Nolan, M. M. Boer, R. A. Bradstock, F. Domingo, and M. L. Goulden (2015.), A semi-mechanistic model for predicting the moisture content of fine litter, *Agric. For. Meteorol.*, 203, 64–73
- (Rothermel, 1983.) Rothermel, R. C. (1983.) How to predict the spread and intensity of forest and range fires. *Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Exp. Station, 1983*
- (Scott & Burgan, 2005.) Scott, J. H.; Burgan, R. E. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model, *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. U.S. Dept. of Agriculture, 2005* - https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_series/rmrs/gtr/rmrs_gtr153.pdf
- (Scott, 2012.) Scott, Joe H. (2012.) Introduction to Wildfire Behavior Modeling, National Interagency Fuels, Fire, & Vegetation Technology Transfer, 2012.
http://pyrologix.com/wp-content/uploads/2014/04/Scott_20121.pdf
- (Stipaničev & Bugarić, 2015.) Stipaničev, D., Bugarić, M., (2015.) Fuel Moisture Content (FMC) determination and measurement, IPA Adriatic Holistic WP5-4 Del 6-1, 2015.
- (Stipaničev et al., 2022.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Bakšić, N., Bakšić, D., (2022.) Fuel Moisture Content in Croatian wildfire spread simulator AdriaFirePropagator // *Advances in Forest Fire Research 2022 / Domingos Xavier Viegas, Luís Mário Ribeiro (ur.)*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2022. str. 216-221 https://doi:10.14195/978-989-26-2298-9_35
- (Stipaničev & Bugarić, 2023.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Dead Fuel Moisture Content in Wildfire Propagation Potential Estimation for Split-Dalmatia County, *2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split/Bol, Croatia, 2023, pp. 1-6, <https://doi:10.23919/SpliTech58164.2023.10192943>
- (Stipaničev et al., 2024.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Božić Štulić, D., Šerić, Lji., Krstinić, D., Wildfire propagation potential for Split-Dalmatian County in Croatia, *Proceedings for the 7th International Fire Behavior and Fuels Conference, April 15-19, 2024, Boise, Idaho, USA – Tralee, Ireland – Canberra, Australia*, Published by the International Association of Wildland Fire, Missoula, Montana, USA
- (Van der Kamp et al., 2017.) Van der Kamp D.W., Moore R.D., Mckendry I.G., (2017.) A model for simulating the moisture content of standardized fuel sticks of various sizes. *Agric. For. Meteorol.* 2017, 236, 123–134.
- (Van Wagner, 1987.) Van Wagner, C.E. (1987.) Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Technical Report No. 35. Canadian Forestry Service, Chalk River, Ontario*
- (Viegas et al, 2001.) Viegas D.X., Pinol J., Viegas M.T., Ogaya R. 2001. Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically based indices. *International Journal Wildland Fire* 10: 223-240. <https://www.publish.csiro.au/wf/wf01022>
- (Viegas, 2005.) Viegas D.X. (2005) Forest Fire Meteorology Research and Application, Presentation at WWRP Wildfire Workshop, Melburn, Australia, 6-10 June 2005 - http://www.powershow.com/view1/1c2a52-ZDc1Z/Forest_Fire_Meteorology_Research_and_Application_powerpoint_ppt_presentation
- (Wanielista et al., 1997) Wanielista, M.; Kersten, R.; Eaglin, R. *Hydrology: Water Quantity and Quality Control*, 2nd ed.; Wiley: New York, NY, USA, 1997.

(Yebra, M. et al. 2013.) Yebra, M. et al. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products, Remote Sensing of Environment, Volume 136, September 2013, Pages 455–468
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425713001831>