

# Priprema i obrada numeričke mreže za računalne simulacije širenja šumskih požara

---

**Grubješić, Andrej**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:067573>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-03**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PRIPREMA I OBRADA NUMERIČKE MREŽE ZA RAČUNALNE  
SIMULACIJE ŠIRENJA ŠUMSKIH POŽARA**

Rijeka, srpanj 2024.

Andrej Grubješić

0069092048

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**PRIPREMA I OBRADA NUMERIČKE MREŽE ZA RAČUNALNE  
SIMULACIJE ŠIRENJA ŠUMSKIH POŽARA**

Mentor: izv.prof. dr. sc. Stefan Ivić

Komentor: prof. dr. sc. Jerko Škifić

Rijeka, srpanj 2024.

Andrej Grubješić

0069092048

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo  
Predmet: Računarske metode

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Andrej Grubješić (0069092048)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)  
Zadatak: **Priprema i obrada numeričke mreže za računalne simulacije širenja šumskih požara / Preparation and processing of a numerical mesh for wildfire computer simulations**

### Opis zadatka:

U uvodnom dijelu završnog rada potrebno je opisati postojeće matematičke modele širenja šumskih požara, te dati pregled znanstvene literature vezane uz temu rada. Opisati pristup rješavanja matematičkih modela temeljenih na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama u programskom paketu OpenFOAM. Pripremiti računalnu proceduru za pripremu i objedinjavanje numeričke mreže ovisno o različitim formatima i zaspisima prostornih podataka terena, vegetacije te linijske infrastrukture. Primijeniti model širenja šumskog požara u OpenFOAM-u te provesti testiranje i proračune za različite realistične scenarije šumskih požara. Dobivene rezultate vizualizirati i animirati, te napraviti analizu i usporedbu. U završnom dijelu završnog rada istaknuti najvažnije zaključke, komentare i preporuke za daljnji razvoj korištene metodologije.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Stefan Ivić

Komentor:  
prof. dr. sc. Jerko Škifić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:  
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

## IZJAVA

Sukladno članku 9. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku prijediplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, iz lipnja 2011. godine, ja, Andrej Grubješić, student prijediplomskog sveučilišnog studija strojarstva, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad na temu „Priprema i obrada numeričke mreže za računalne simulacije širenja šumskih požara“, pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Stefana Ivića i prof. dr. sc. Jerka Škifića.

Rijeka, ožujak 2024.

---

Andrej Grubješić

0069092048

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Stefanu Iviću na vodstvu, prenesenom znanju, stručnim smjericama i pomoći prilikom izrade završnog rada.

# SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Prirodni požari i njihovi učinci</b> .....	<b>2</b>
2.1. Požari u Europi .....	3
2.2. Karakteristike širenja i vrste šumskih požara .....	6
2.3. Matematički modeli širenja šumskih požara .....	11
<b>3. Matematički model širenja požara</b> .....	<b>14</b>
3.1. Formulacija modela širenja i opis korištenih parametara .....	14
<b>4. Numerička mreža za simulaciju širenja požara</b> .....	<b>18</b>
4.1. GMSH.....	18
4.2. Vrste numeričke mreže .....	20
4.3. Izrada numeričke mreže za simulaciju požara .....	22
4.4. Vizualizacija mreže odabranih područja.....	25
<b>5. Izrada simulacije širenja požara</b> .....	<b>31</b>
5.1. Odabir vrijednosti parametara modela.....	31
5.1.1. Vrijednosti parametara naselja Drenova .....	31
5.1.2. Vrijednosti parametara u blizini grada Vareš.....	32
5.1.3. Vrijednosti parametara u blizini grada Belluno.....	33
5.2. Vizualizacija rezultata simulacije širenja požara terena Drenova .....	34
5.3. Vizualizacija rezultata simulacije širenja požara terena Vareš.....	37
5.4. Vizualizacija rezultata simulacije širenja požara terena Belluno.....	41
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>46</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>47</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>48</b>
<b>POPIS TABLICA</b> .....	<b>50</b>

**SAŽETAK** ..... 51

**ABSTRACT** ..... 52





## 1. Uvod

Šumski požari predstavljaju jedne od bitnijih ekoloških, ekonomskih i društvenih problema današnjeg vremena. Uništavaju velike površine šumskih ekosustava, dovodeći do gubitka bioraznolikosti, degradacije tla, oslobađanja velikih količina ugljičnog dioksida, što doprinosi globalnim klimatskim promjenama. Osim ekoloških posljedica, šumski požari uzrokuju i značajne ekonomske štete uništavanjem drvene mase, infrastrukture, te smanjenjem prihoda od turizma i poljoprivrede.

Rješavanje problema šumskih požara zahtijeva multidisciplinarni pristup koji uključuje prevenciju, pravovremenu detekciju, učinkovitu intervenciju i obnovu pogođenih područja. Kako bi se mogli umanjiti mogući problemi i štete nastale od požara i njegovog širenja, bitno je veliku pozornost obratiti na pripremu i planiranje akcije gašenja požara. Jedan od pristupa koji bi uvelike mogao pridonjeti olakšanju izrade tih planova su simulacije širenja požara temeljene na fizikalnim zakonitostima.

Tema ovog završnog rada biti će bazirana upravo na izradi simulacije širenja požara kroz odabrano geografsko područje. Izrada simulacije u ovom radu će biti detaljnije razrađena kroz 2 osnovna dijela. Prvi dio će obuhvaćati prikupljanje podataka za izradu numeričke mreže, izradu, prilagođavanje i vizualizaciju mreže u programu GMSH. Drugi dio izrade simulacije širenja požara obuhvaćati će korištenje izrađene numeričke mreže, odabir vrijednosti odgovarajućih parametara i pokretanje simulacije u programu OpenFOAM. U nastavku su opisane karakteristike požara od globalne rasprostranjenosti šumskih požara i frekvencije i sezonalnosti požara do fizičkih svojstava šumskih požara. U trećem poglavlju razraditi će se fizikalne zakonitosti na kojima se temelji izrada modela za simulaciju požara. Četvrto poglavlje prikazati će izradu mreže i korištenje programa GMSH, a peto poglavlje će se odnositi na simulaciju te prikaz rezultata simulacije širenja požara za različita geografska područja. Na kraju rada izražen je dan je pregled rada i zaključci.

## 2. Prirodni požari i njihovi učinci

Prirodni ili šumski požari su požari nastali na zapaljivoj vegetaciji u nenaseljenim područjima. Požari mogu biti karakterizirani s obzirom na uzrok zapaljenja, fizikalnim svojstvima i utjecajem vremenskih prilika na vatru. Veliki nekontrolirani šumski požari imaju destruktivan učin na prirodu i cijelokupni njezin ekosustav, narušavaju sigurnost ljudi, zagađuju izvore vode i imaju negativan utjecaj na ekonomiju pogođenog područja. Dimni plinovi nastali izgaranjem također mogu biti opasni za ljudsko zdravlje. Oni se uglavnom sastoje od ugljičnog dioksida, ugljičnog monoksida, vodene pare. Dodatnu opasnost od pojave požara pospješuje globalno zatopljenje koje dovodi do velikih temperatura i suše vegetacije koje rezultira lakšem zapaljenju vegetacije.



*Slika 2.1. Veliki požar šume (Izvor: [1])*

Iako požari prvenstveno imaju negativan učin na prirodu i okolinu, suprotno tome jedna od uobičajnijih i jeftinijih metoda prevencije širenja požara su manji kontrolirani požari radi smanjivanja količine zapaljivog materijala dostupnog za širenje požara. Korištenje vatre u divljini je najjeftinija i ekološki najprikladniji proces prevencije za mnoge šume. Vegetacija se također može uklanjati sječom, ali tretmani vegetacije i prorjeđivanje nemaju utjecaja na ponašanje ozbiljnih požara pod ekstremnim vremenskim uvjetima. Također osim što se manji kontrolirani požari koriste za prevenciju većih požara, određene vrste drveća i drugih biljaka se oslanjaju na požare svakih nekoliko godina kako bi njihova sjemena proklijala.



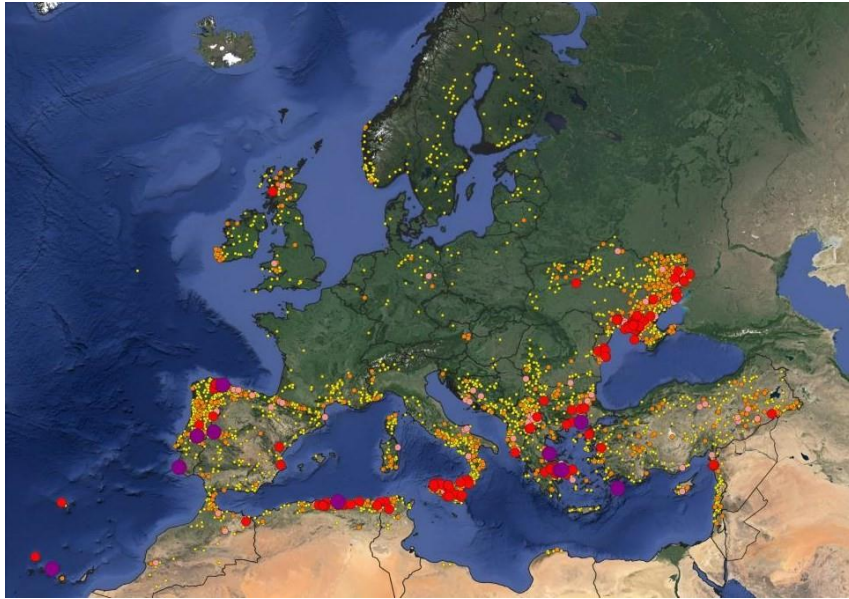
*Slika 2.2. Kontrolirani požar (Izvor: [2])*

Zbog navedenih negativnih utjecaja velika pozornost se obraća na prevenciju i detekciju požara. Osim navedenih metoda kontroliranih požara za prevenciju, veliku pomoć suzbijanja požara pridodaju numeričke simulacije širenja požara. Pomoću simulacija može se vizualno predočiti tijek širenja požara u vremenu, a time i povećati sigurnost vatrogasaca.

## **2.1. Požari u Europi**

U područjima gdje je gorivo dostupno, vrijeme igra ključnu ulogu u određivanju rizika od požara. Indeksi opasnosti od požara koriste se za razumijevanje kako se zapaljivost određenog područja mijenja u odgovoru na vremenske uvjete te za procjenu potencijalnog širenja i intenziteta požara. Ovi se indeksi izračunavaju na temelju parametara kao što su temperatura, relativna vlažnost zraka, brzina vjetera, količina oborina, sadržaj vlage u potencijalnom gorivu i prevladavajući vremenski uvjeti tijekom prethodnih dana do mjeseci.

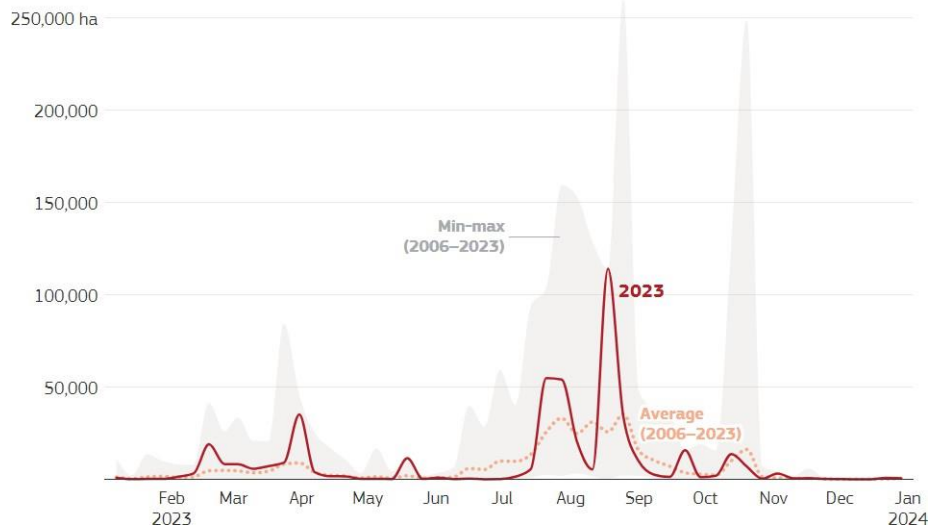
U 2023. godini visoke razine opasnosti od požara zabilježene su u sjevernoj Europi početkom ljeta, posebno u sjeveroistočnim regijama, uzrokovani iznad prosječno toplim uvjetima u svibnju i lipnju. Kontinuirana suša doprinijela je višim razinama opasnosti od požara u jugozapadnoj Europi. To se poklopilo s vrhuncem glavne sezone požara za južnu Europu i europski Mediteran, u srpnju i kolovožu.



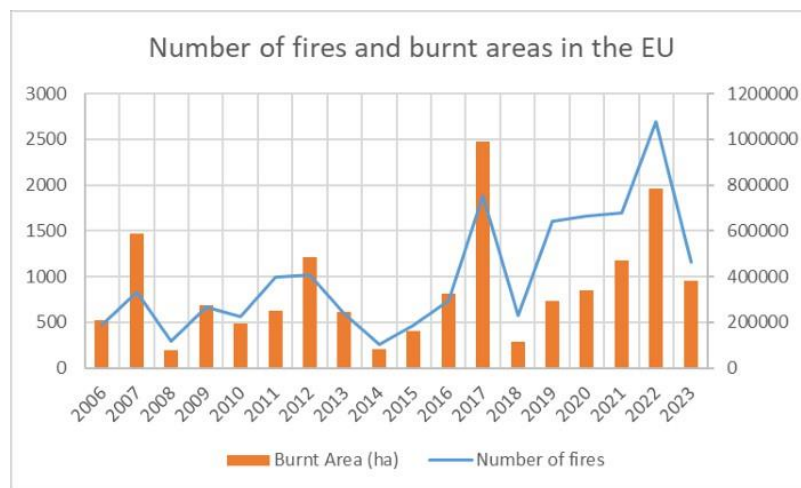
*Slika 2.3. Prikaz izgorjenih površina u Europi i Mediteranu u 2023. godini. Žute točke označavaju izgorjena područja do 100 ha, narančaste do 500 ha, ružičaste do 1000 ha, crvene do 5000 ha, a ljubičaste područja veća od 5000 ha. (Izvor: [3])*

Iz slike 3.1. se može vidjeti da su upravo centralna Europa i Mediteran vodeća područja po veličini zahvaćene površine požarom. Najgore godine za požare obično se javljaju tijekom sezonskih ekstrema, kada vlažna sezona koja potiče bujan rast biljaka bude praćena izuzetno suhom sezonom koja izvlači vodu iz biljaka i tla potpomognuto sa upravo iznimno visokim temperaturama i neprekidnom sušom. Jaki i ekstremni požari se javljaju upravo u ljetnim mjesecima. Na slici 3.2. prikazana je statistika količina opožarene površine u ovisnosti o mjesecima. Osim vremenskih uvjeta koji olakšavaju stvaranje i razvoj širenja požara na Mediteranu, vegetacija je bitni faktor. Velika gustoća šume koje uglavnom sadržavaju jelkino drveće, borove, te hrastove i čemprese pospješuju brzo i intenzivno širenje požara. Sjeverni dio Europe zbog učestalijih ljetnih kiša i nižih ljetnih temperatura nema problem sa ekstremnim požarima.

Količina šumskih požara u Europi se mijenja od godine do godine. Svaka regija ima svoj uobičajeni obrazac površina koje se obično zapale svake godine, no ponekad se dogode godine kada je ta površina značajno veća od prosjeka. To može biti rezultat povećanog broja pojedinačnih požara ili pojave požara veće razorne moći. U proteklih 5 godina količina opožarene površine koja zahvaća Europu na godišnjoj razini je zamjetljivo porasla.



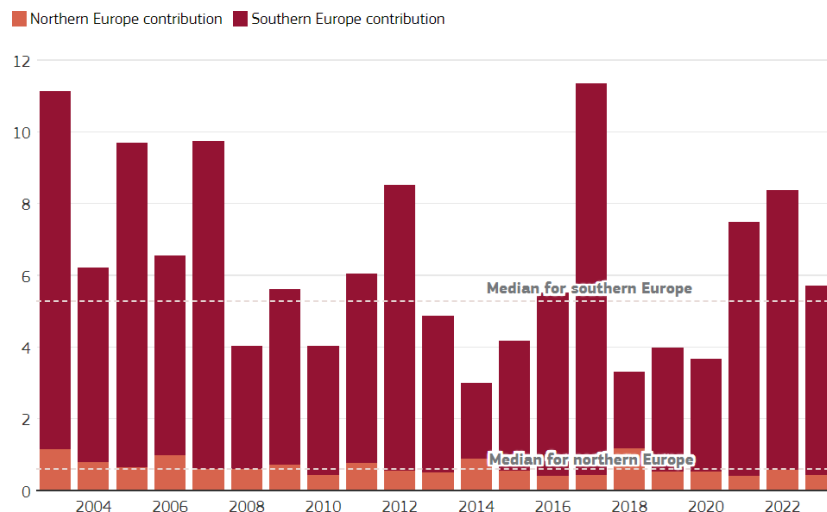
Slika 2.4. Količina opožarene površine po mjesecima u 2023. godini (Izvor: [3])



Slika 2.5. Broj požara i opožarene površine proteklih godina (Izvor: [4])

Na slici 3.3. je prikazana statistika količine opožarene površine po godinama od 2006. do 2023. godine i količina požara nastalih po godinama. Za oba podatka vidimo uzlazni trend u prethodnih 5 godina.

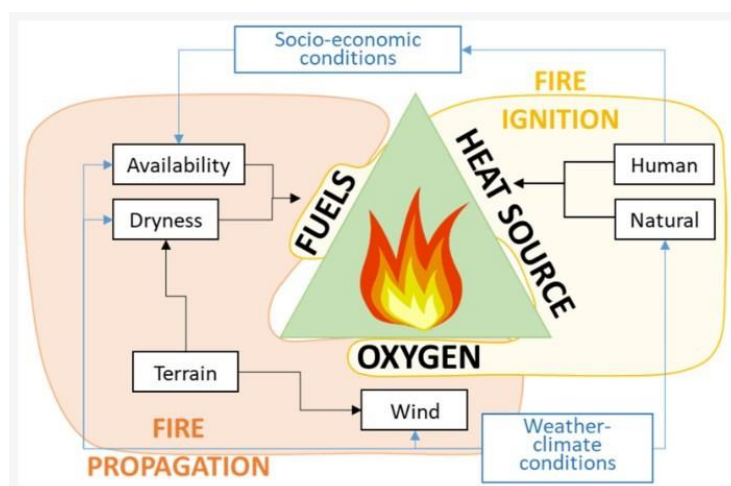
Jedan od navedenih bitnih posljedica požara su i dimni plinovi koji nastaju izgaranjem vegetacija. Kako se povećava količina požara tako vrijedi i logika povećanja količine emisija CO<sub>2</sub> nastala izgaranjem vegetacije. Na slici 3.4. je prikazana godišnja emisija CO<sub>2</sub> uzrokovana šumskim požarima od 2003. do 2023. godine.



Slika 2.6. Prikaz količine emisija CO<sub>2</sub> uzrokovana šumskim požarima proteklih godina (Izvor: [4])

## 2.2. Karakteristike širenja i vrste šumskih požara

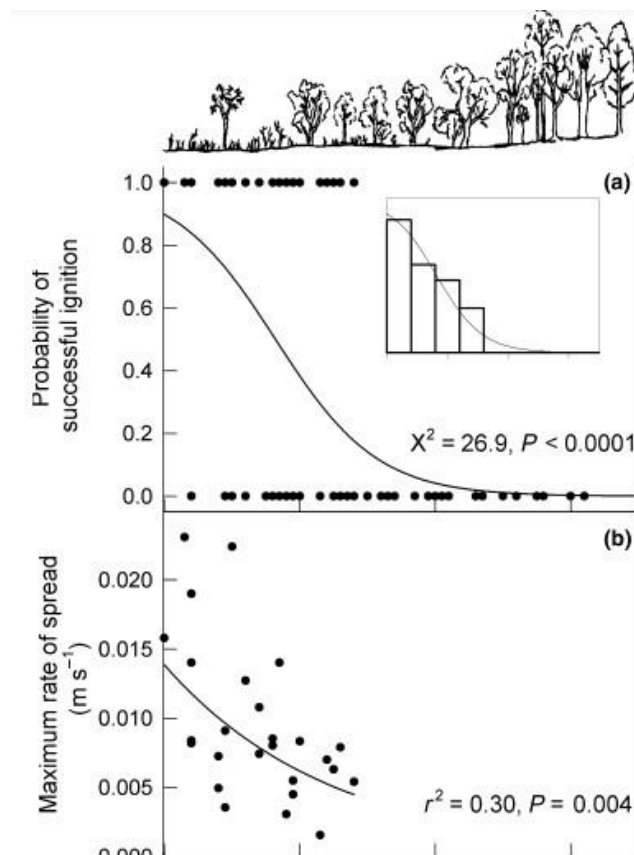
Za nastanak i širenje požara potrebni su kisik, gorivo i visoka početna temperatura. Temperatura paljenja mora biti osigurana barem na lokaliziranom području (npr. iskrom) kako bi se osigurala energija aktivacije potrebna za početak razbijanja molekularnih veza u gorivu [5]. Nakon što se zapali, oslobođena energija aktivira ostale molekule i reakcija izgaranja nastavlja se samostalno.



Slika 2.7. Elementi potrebni za proces izgaranja (Izvor: [5])

Što je veća količina zraka dostupna za izgaranje vegetacije (goriva) to će se vatra lakše širiti. Stoga je vjetar ključni čimbenik u širenju požara. Snažan vjetar može nositi plamenove i

iskre daleko od izvorne vatre, stvarajući novu liniju požara. Osim toga, vjetar može povećati dotok kisika u požar, što dovodi do još bržeg širenja i intenzivnijeg izgaranja. Temperatura potrebna za započinjanje šumskog požara iznosi 210 – 497 °C ovisno o vrsti vegetacije koja je zahvaćena. Iznimno visoka temperatura na maloj površini u prirodi se može javiti zbog različitih utjecaja. Udar munje i erupcija vulkana bi bili prirodni čimbenici koji bi mogli utjecati na stvaranje tako visoke temperature, ali su dosta rijetki. Najčešći uzročnik požara u prirodi je čovjekov nemar. Uzrok nastajanja požara može biti bačeni opušak, razbijeni komad stakla koji koncentrira snop sunčevih zraka u jednu točku i dovede do zapaljenja, neugašene logorske vatre, itd. Dostupno gorivo za proces izgaranja ovisiti će o vrsti dostupne vegetacije. Tako će listopadna i zimzelena drveća imati najveći udio dostupnog goriva, dugo će goriti i zadržavati toplinu, ali im je potrebna viša temperatura zapaljenja. Visoke trave i grmoliko bilje će se lakše i brže zapaliti dok im je vrijeme izgaranja brže i zadržavanja topline manje. Otpadnute manje grane, niska trava i suho lišće će imati najbrže vrijeme zapaljenja zbog manje površine i volumena, ali i izgaranja dok se toplina najbrže oslobađa i gubi u okolinu. Na slici 4.2. prikazana je mogućnost uspješnog zapaljenja i maksimalna brzina širenja požara u ovisnosti o vrsti vegetacije.



Slika 2.8. Karakteristika požara ovisna o vegetaciji (Izvor: [6])



Zbog nejednolikog rasporeda vrsta različite vegetacije, javljaju se i različite vrste požara. Osnovna podjela šumskih požara je: požar tla, prizemni požar i požar krošnje.

Požari tla se mogu pojaviti u područjima s velikim nakupinama mrtve vegetacije tijekom vremena, poput humusa i treseta. Kreću se polako ispod površine terena, što ih čini teško vidljivima iz zraka. Ako je dostupno dovoljno suhog goriva, podzemne požare može biti izuzetno teško ugastiti.



*Slika 2.9. Podzemni požar (Izvor: [7])*

Površinski požari spaljuju rasuto igličasto lišće, mahovinu, lišajeve, zeljastu vegetaciju, grmlje, mala stabla i mladice koje su na ili blizu površine tla, uglavnom kroz plameno izgaranje. Površinski požari koji se šire u površinskim gorivima diktiraju velik dio širenja požara. Oni mogu rasti u tolikoj mjeri da zahvate ili čak unište krošnje šuma, karakteristiku koja se vidi kod požara krošnje.



*Slika 2.10. Površinski požar (Izvor: [7])*

Požari krošnje spaljuju goriva u krošnjama šume, koja uključuju živu i mrtvu krošnju ili grane, lišajevе na drveću i visoko grmlje koje leži iznad površinskih goriva. Obično ih zapali površinski požar. Takvi požari mogu biti pasivni ili aktivni. Pasivni uključuju spaljivanje pojedinačnih stabala ili malih grupa stabala. Aktivni krošnji požari predstavljaju čvrsti zid plamena od površine do slojeva goriva u krošnjama. Aktivni krošnji požari šire se s jedne krošnje stabla na drugu kroz krošnje.

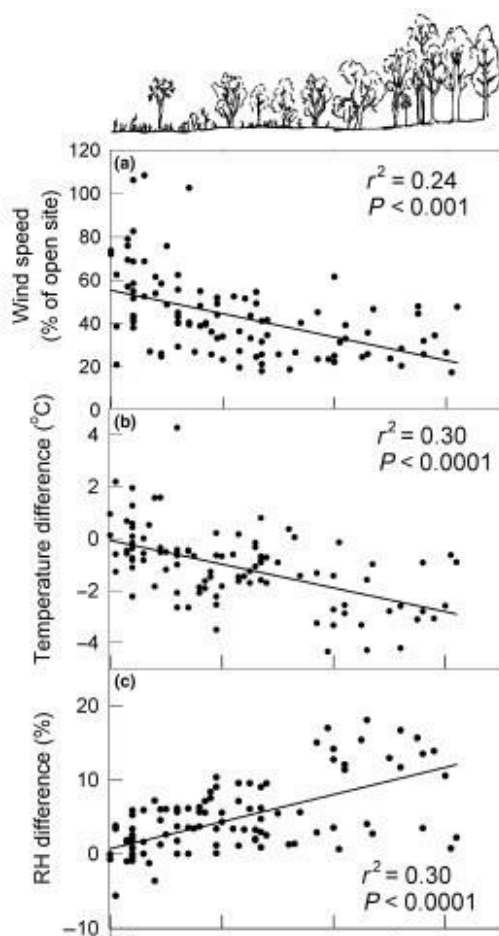


*Slika 2.11. Požar krošnje (Izvor: [7])*

Osim dostupnog goriva (vegetacije), dva dodatna bitna faktora na širenje požara su vremenski uvjeti i topografija zahvaćenog terena.

Vremenski uvjeti koji značajno utječu na stvaranje i širenje požara su vjetar i vlažnost područja. Od ta dva faktora, vjetar je najpromjenjiviji i najmanje predvidljiv. Vjetrovi, osobito blizu površine zemlje, u direktnoj su vezi sa oblikom topografije i lokalnim zagrijavanjem i hlađenjem. Vjetar ima mnogostruki utjecaj na šumske požare. On uklanja zrak bogat vlagom i ubrzava sušenje šumskih goriva. Lagani vjetrovi pomažu vatrenim iskrama da zapale požar. Kada požar jednom započne, vjetar pojačava izgaranje povećanjem dotoka kisika. Pomaže širenju požara prenoseći toplinu i goruće žeravice na nova goriva te savijanjem plamena bliže neizgorenim gorivima ispred požara. Smjer širenja požara uglavnom je određen smjerom vjetra. Vlažnost zraka utječe na mogućnost zapaljenja goriva i ovisiti će o količini padalina i gustoći vegetacije. Na slici 4.6. je prikazana brzina, razlika temperature zraka i razlika relativne vlažnosti na različitim vegetacijskim područjima. Iz prikazanog se može zaključiti kako na mjestima šuma sa visokim stablima vjetar će slabije prolaziti i imati će veću relativnu

vlažnost jer sunčeve zrake ne mogu doprijeti do tla zbog krošnji. Dok će na mjestima niske vegetacije vjetar moći lakše prolaziti i biti će manja relativna vlažnost tla.



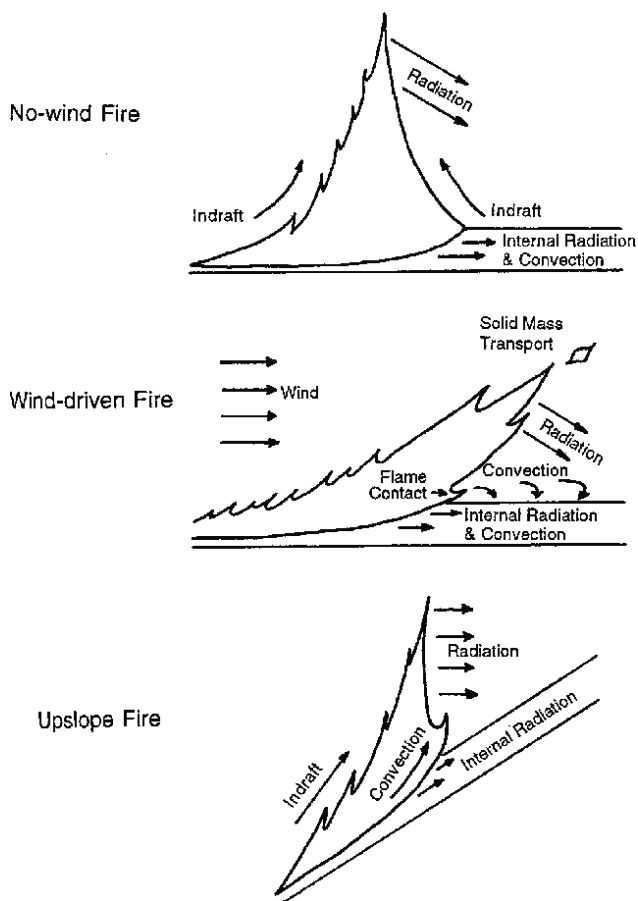
Slika 2.12. Prikaz ovisnosti brzine vjetra, temperaturne razlike i relativne vlažnosti s obzirom na vrstu vegetacije (Izvor: [6])

Topografija terena je predvidljiv faktor širenja požara. Nagib, elevacija i smjer padine su djelovi topografskog faktora koji utječe na širenje požara. Nagib je količina kuta uspona padine. Vatra se brže širi uzbrdo nego nizbrdo jer je vegetacija efektivnije predgrijava širenjem plamena i vatre uzbrdo. Što je nagib veći biti će brže širenje požara.

Položaj padine odrediti će kolika će se količina topline preuzeti od sunčevih zraka. Južne i jugozapadne padine primaju veću količinu sunčevih zraka nego sjeverna strana. Zbog izlaganja suncu južne i jugozapadne strane terene imaju višu temperaturu, manju relativnu vlažnost i suše gorivo. Ove padine obično imaju manje vegetacije i tipično manje te rjeđe gorivo. Padine prema jugu ili jugozapadu obično su sklonije zapaljenju i imaju povećano ponašanje požara u usporedbi s padinama prema sjeveru ili sjeveroistoku.

Nadmorska visina može utjecati na ponašanje požara na nekoliko načina: količinu i

vrijeme padalina, toplinu i izloženost vjetru. Goriva se ranije isušuju tijekom godine na nižim nadmorskim visinama gdje je toplije nego na višim nadmorskim visinama. Na višim nadmorskim visinama snijeg obično duže ostaje što utječe na vlažnost goriva i time na početak sezone požara. Više nadmorske visine obično imaju više udara munja.



Slika 2.13. Utjecaj vjetra i terena na širenje vatre (Izvor: [8])

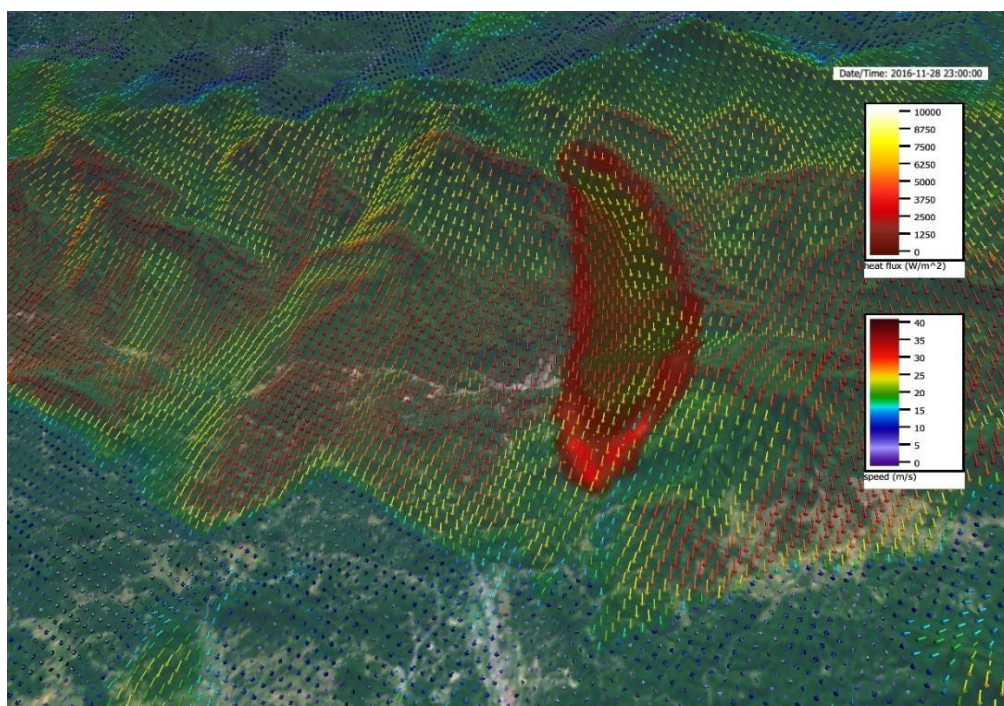
### 2.3. Matematički modeli širenja šumskih požara

Modeliranje požara bavi se numeričkom simulacijom požara radi razumijevanja i predviđanja ponašanja vatre. Cilj modeliranja požara je pomoći pri suzbijanju požara, povećati sigurnost vatrogasaca i javnosti te minimalizirati štetu. Upotreba računala ključna je u procesu, uključujući statističku analizu prošlih požara kako bi se predvidjeli rizici od iskri i ponašanje fronta požara. Različiti modeli širenja požara su predloženi u prošlosti, uključujući jednostavne modele poput elipsa te složenije modele poput jajastih i ventilatorskih oblika. Raniji pokušaji određivanja ponašanja požara pretpostavljali su jednodnost terena i vegetacije,

no točno ponašanje fronte požara ovisi o brzini vjetra i nagibu terena. Suvremeni modeli rasta temelje se na fizikalnim principima širenja kako bi simulirali širenje požara kao kontinuirano rastući poligon.

Modeli širenja šumskih požara obično su klasificirani u dva tipa: stohastički i deterministički model. Stohastički modeli koji predviđaju vjerojatnije ponašanje na temelju prosječnih uvjeta i sakupljenog znanja dobivenog laboratorijskim i unutarnjim ispitivanjem širenja vatre. Deterministički model (polu-empirijski i fizikalni) u kojem se ponašanje vatre temelji na zakonima očuvanja (mase, energije, momenta..) koji upravljaju razvojem sustava sačinjen od plamena i njegove okoline.

Polu-empirijski model zasnovani su na energetskej ravnoteži i pretpostavci da je energija prenesena na neizgoreno gorivo proporcionalna energiji oslobođenoj izgaranjem goriva. Fizikalni modeli uzimaju u obzir jedan ili više procesa prijenosa energije od zone izgaranja do zone neizgorenog goriva. Opisuje kako dio energije oslobođen vatrom predgrijavaju neizgoreno gorivo, omogućavajući njegovo širenje. Plamen se smatra površinom na konstantnoj temperaturi sa koje se prenosi energija na okolnu vegetaciju pomoću zračenja. Ovakvi modeli su jednostavniji i opisani pomoću sustava parcijalnih diferencijalnih jednačbi. Kompleksniji modeli kombiniraju modele dinamike fluida i model širenja šumskih požara. Primjer jednog takvog modela je “Coupled Atmosphere-Wildland Fire-Environment model” (CAWFE).



Slika 2.14. Pyregence (program koji koristi CAWFE model širenja) (Izvor: [9])

Potrebno je obratiti pozornost na složenost korištenog modela jer sa porastom složenosti raste i porast vremena potrebnog za modeliranje i izradu simulacije širenja požara. Iz tog razloga modeli koji koriste detaljno opisane fizikalne procese izgaranja, nisu mogući za korištenje u svrhu pretpostavke širenja požara, jer zahtjevaju veliki broj kemijskih reakcija i veliku rezoluciju numeričke mreže. Sa tim saznanjem pogodno je koristiti se tehnikom asimilacije podataka pri korištenju modela. Asimilacija podataka je tehnika koja se koristi za uključivanje podataka u izvodeći model koristeći se uzastopnom statističkom procjenom. Asimilacija podataka je neophodna tehnika, kako nijedan model nije savršen, dostupni podaci su raspršeni kroz vrijeme i prostor, te su opterećeni greškama. Matematički model koji je korišten za izradu simulacije u ovom radu je temeljen na modelu iz rada [10].

### 3. Matematički model širenja požara

U poglavlju je opisan matematički model preuzet iz rada [10]. Model širenja požara je formuliran na temelju jednadžbi očuvanja energije i gorivu, gdje gubitak goriva zbog izgaranja odgovara brzini reakcije goriva. U nastavku su opisani parametri korišteni u parcijalnim diferencijalnim jednadžbama koji se mogu aproksimirati iz prehodnih mjerenja šumskih požara.

#### 3.1. Formulacija modela širenja i opis korištenih parametara

Parametri korišteni u jednadžbama:

$T$  [K] – Temperatura sloja vatre

$S \in [0,1]$  – Relativna količina dostupnog goriva

$k$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] – Termalna difuzivnost

$A$  [ $\text{Ks}^{-1}$ ] – Porast temperature u sekundama pri maksimalnoj brzini sagorjevanja, s potpunim dostupnim gorivom i bez prisutnog hlađenja

$B$  [K] – Koeficijent proporcionalnosti u modificiranom Arrheniusovom zakonu

$T_a$  [K] – Temperatura okoline

$C$  [ $\text{K}^{-1}$ ] – Koeficijent konvekcije prema okolini

$C_s$  [ $\text{s}^{-1}$ ] – Brzina relativne potrošnje goriva

$Z$  [m] – Nadmorska visina točke

$k_w$  [1] – Koeficijent advekcije vjetra

$v$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] – Brzina vjetra

$k_s$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] – Koeficijent advekcije terena

Parcijalne diferencijalne jednačbe za temperaturu i gorivo na kojima se temelji model širenja:

$$\frac{dT}{dt} = \nabla(k\nabla T) - k_w \vec{v} \nabla T - k_s \nabla Z \cdot \nabla T + A (S e^{\frac{-B}{T-T_a}} - C(T - T_a)), \quad (3.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -C_s S e^{\frac{-B}{T-T_a}}, \quad T > T_a. \quad (3.2)$$

Difuzijski član  $\nabla(k\nabla T)$  opisuje prijenos topline na kratke udaljenosti zračenjem u polupropusnom mediju. Izraz  $k_w \vec{v} \nabla T$  opisuje toplinu koju vjetar prenosi. Izraz  $k_s \nabla Z \cdot \nabla T$  [11] je nadodani član u odnosu na izraz iz rada [10] koji opisuje utjecaj nagiba terena na širenje topline gdje je gradijent elevacije  $\nabla Z$  uzročnik tog širenja.  $S e^{\frac{-B}{T-T_a}}$  opisuje brzinu kojom se gorivo troši zbog sagorijevanja,  $AC(T - T_a)$  modelira konvekcijski gubitak topline prema atmosferi. Reakcijska brzina  $e^{\frac{-B}{T-T_a}}$  dobiva se modificiranjem Arrheniusove reakcijske brzine  $e^{\frac{-B}{T}}$  pomoću pomaka kako bi se osigurala početna reakcija pri okolnoj temperaturi [10].

Arrheniusova reakcijska brzina dana je izrazom:

$$r(T) = e^{\frac{-B}{T}}. \quad (3.3)$$

Ovaj izraz vrijedi samo za plinovito gorivo kojem je unaprijed dodana dovoljna količina goriva. Iz izraza (3.3) je vidljivo kako je reakcijska brzina  $r(T)$  različita od nule za  $T \neq 0$ . Izraz je modificiran tako da se oksidacija ne može desiti ispod zadane vrijednosti  $T_0$ .

$$r(T) = \begin{cases} e^{\frac{-B}{T-T_0}}, & T > T_0 \\ 0, & T \leq T_0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Razmotrimo teoretski slučaj u kojem je temperatura  $T$  konstantna u prostoru. U tom slučaju zaostaju jedino toplina zbog sagorijevanja i prirodne konvekcije, a difuzijski član i član vjetra i nagiba koji utječu na prijenos topline su jednaki nuli zbog konstantne temperature  $\nabla T = 0$ . Relativna potrošnja goriva je zanemariva ( $C_s \approx 0$ ,  $S \approx 1$ ).

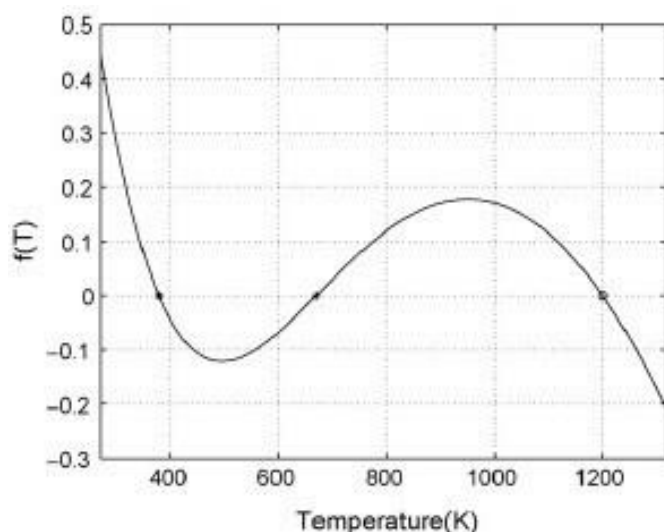


Izraz (3.1) poprima oblik:

$$\frac{dT}{dt} = A (S e^{\frac{-B}{T-T_0}} - C(T - T_a)) = 0, \quad (3.5)$$

$$f(T) = S e^{\frac{-B}{T-T_0}} - C(T - T_a) = 0. \quad (3.6)$$

Izdvajanjem netrivialnog rješenja dobivamo izraz (3.6). Konstantne vrijednosti temperature koje su rješenja jednadžbe (3.6) nazivaju se ravnotežne točke, i u tim točkama toplina koju proizvodi reakcija jednaka je toplini koja se gubi u okolinu. Izraz (3.6) može imati maksimalno 3 rješenja. Prva nul vrijednost označena sa  $T_p$ , se naziva nisko temperaturni režim i stabilna je ravnotežna temperatura. Ako temperatura padne ispod temperature  $T_p$ , onda toplina dobivena iz reakcije prevladava i temperatura raste. Druga nul vrijednost  $T_i$  je nestabilna ravnotežna točka i suprotno temperaturi  $T_p$ , ako temperatura padne ispod  $T_i$  tada nastupa hlađenje i temperaturu počinje padati. Iznad temperature  $T_i$ , toplina zbog kemijskih reakcija prevladava pa temperatura raste.  $T_i$  predstavlja temperaturu samozapaljenja. Treća nul vrijednost je stabilna ravnotežna temperatura  $T_c$ . To je najviša stabilna temperatura zapaljenja.  $T_p$  se naziva visoko temperaturni režim.



Slika 3.1. Prikaz funkcije  $f(T)$  i njenih nul vrijednosti (Izvor: [10])

Pomoću opisanih ravnotežnih točaka možemo odrediti vrijednost parametara B i C. Pretpostavljeni odnos točaka je:  $T_0 \leq T_a < T_i < T_c$ .

$$B = \frac{\ln((T_i - T_a)/(T_c - T_a))}{1/(T_c - T_0) - 1/(T_i - T_0)}, \quad (3.7)$$

$$C = \frac{e^{-B/(T_i - T_0)}}{(T_i - T_a)}.$$

Posljednji parametar bitan za određivanje stabilnosti, samoodrživosti i dinamike širenja požara je parametar A. Njega možemo odrediti pomoću karakterističnog vremena hlađenja. Nakon što je prolaskom vatre sva količina raspoloživog goriva potrošena, temperatura pada, a toplina oslobođena reakcijom i difuzijom padne na nezamjetnu razinu. U tom trenutku temperatura zadovoljava izraz:

$$\frac{dT}{dt} = -AC(T - T_a) = 0. \quad (3.8)$$

Na stražnjoj strani vala vatre, temperatura  $T$  nakon vremena  $t_0$  iznosi:

$$T(t) = T_a + (T(t_0) - T_a)e^{-AC(T - T_a)}. \quad (3.9)$$

Definiranjem karakterističnog vremena hlađenja  $t_c$  kao vremena potrebnog da se sloj vatre ohladi za faktor  $1/e$ :

$$T(t_0 + t_c) - T_a = \frac{1}{e}(T(t_0) - T_a), \quad (3.10)$$

Slijedi da je  $ACt_c = 1$ , odnosno:

$$A = 1/Ct_c. \quad (3.11)$$

## 4. Numerička mreža za simulaciju širenja požara

Numerička mreža predstavlja diskretizaciju geometrije u manje jednostavne oblike poput trokuta ili četverokuta u dvije dimenzije i tetraedre ili heksaedre u tri dimenzije. Ona je jedna od osnovnih elemenata u radu sa simulacijama. To je sustav sastavljen od ćelija i točaka, a koristi se prilikom rješavanja parcijalnih diferencijalnih jednačbi. Svaka ćelija mreže predstavlja jedno zasebno rješenje te jednačbe, koje u kombinaciji skupa predstavljaju rezultat cjelokupne mreže. U ovom poglavlju opisati će se program GMSH za izradu numeričke mreže, vrste numeričke mreže, te izrada i vizualizacija mreže potrebna za simulacije ovog rada.

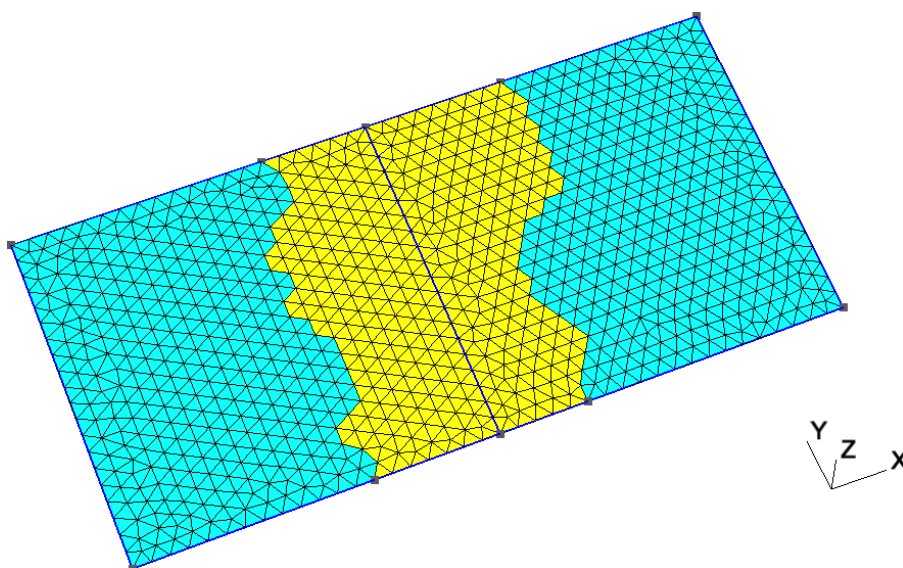
### 4.1. GMSH

GMSH je open-source program za izradu 2D i 3D mreže konačnih elemenata s ugrađenim softverom za podržavanje CAD formata i post-processorom. Njegova izrada je temeljena na četiri područja: geometriji, mreži, rješavaču i post-processingu, koja se mogu kontrolirati pomoću grafičkog sučelja u samoj aplikaciji ili pomoću programskih jezika kao što su C++, C, Python, Julia i Fortran [12]. U ovom radu je mreža izrađena sa programom GMSH pomoću Python API-a.

Model u programu odnosno njegovo područje geometrije definirano je pomoću njegovih granica. Tako je volumen ograničen skupinom površina, površina je ograničena nizom krivulja, a krivulja je ograničena dvjema krajnjim točkama. Entiteti modela su topološki entiteti (čvorovi, linije, lica i volumeni ćelija) i bave se samo odnosima sa susjednim entitetima. Na kraju, grupe tih osnovnih geometrijskih entiteta se mogu zajedno povezati ili odvojiti u različite fizikalne grupe kojima se kasnije u programu za simulacije mogu dodijeliti različiti parametri. Prilikom izrade mreže bitno je definirati odgovarajuće brojčane oznake, jer GMSH upravo izvodi pozivane funkcije na temelju tih oznaka. Tako svaka točka, linija, površina i volumen moraju imati zadanu oznaku.

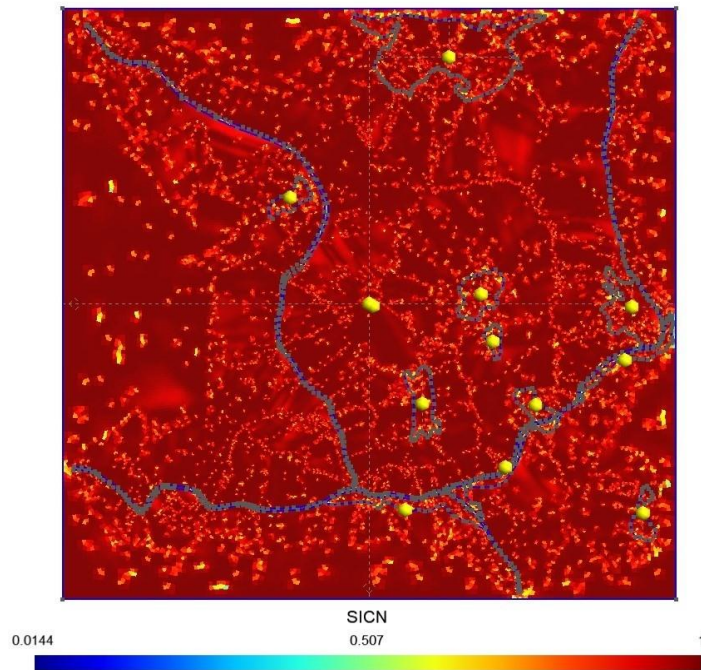
Princip izrade mreže se u osnovi sastoji od definiranja geometrije, tj. točaka, linija koje spajaju te točke, zatvorene krivulje određene pomoću linija i površine na kojoj će biti izrađena mreža. Nakon izrade mreže moguće je vršiti analizu podataka i vizualizaciju mreže.

Kao što je navedeno u uvodu, područje mreže je definirano razdjeljivanjem geometrijskih elemenata na razne oblike (čvorovi, linije, trokuti, četverokuti, itd.), poredani na takav način, ukoliko se dva elementa sijeku to izvode jedino duž lica ćelije, duž ruba ili u čvoru. Ovakav način spajanja definira konformnu mrežu. Da bi se osigurala konformna mreža, izrada mreže je vršena od najmanjeg elementa prema većim. Prvo se diskretiziraju krivulje, zatim se mreža krivulja koristi za umrežavanje površina, te se na kraju mreža površina koristi za umrežavanje volumena. Za izradu mreže se koriste različiti algoritmi koji će biti opisani u narednom poglavlju.



Slika 4.1. Prikaz mreže izrađene u GMSH-u (Izvor: [12])

Područje post-processinga ima mogućnost obrade većeg broja skalarnih, vektorski i tenzorskih podataka. Neke od mogućih operacija vezane uz post-processing obuhvaćaju izračun presjeka, pomicanje geometrije, izvlačenje podataka o komponentama i granicama, modificiranje raspona podataka, izrada animacije. Jedna od prednosti korištenja GMSH-a je njegova ugrađena provjera kvalitete mreže kao i vizualizacija te provjere. Jedna od tih provjera je SICN (signed inverse condition number). Ona evaluira kvalitetu mreže uzimajući u obzir numeričku stabilnost i orijentaciju elemenata. Viša prosječna vrijednost ukazuje na mrežu bolje kvalitete koja će biti stabilna prilikom izračuna parcijalnih diferencijalnih jednačini. Ova činjenica će nam biti potrebna prilikom prilagođavanja mreže za korištenje u programu za izradu simulacije u nastavku.



*Slika 4.2. Vizualizacija kvalitete mreže pomoću metode SICN*

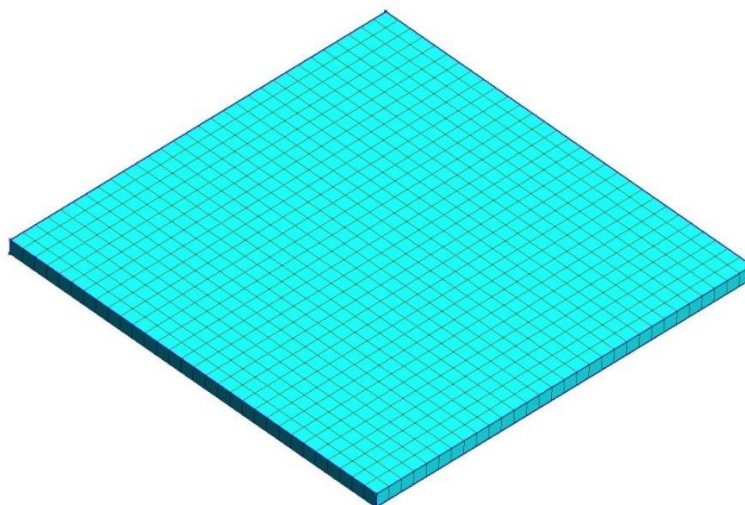
## 4.2. Vrste numeričke mreže

Osnovnu podjelu mreže možemo izvršiti po njejoj strukturiranosti. Po tome razlikujemo dvije vrste mreža: strukturiranu i nestrukturiranu mrežu.

Strukturirana mreža pruža jednostavnost i efektivnost, također zahtjeva znatno manje memorije nego uobičajnije nestrukturirane mreže sa istim brojem elemenata. Manje zauzimanje memorije prilikom zapisa se dešava jer se spajanje čvorova i ćelija u strukturiranoj mreži omogućava bez potrebe da se svaka veza pohrani zasebno. Takve mreže su organizirane poput rešetke, gdje pozicija svakog elementa u memoriji govori koje su mu susjedne ćelije. Dodatno kvaliteta mreže nije upitna u ovom slučaju jer je geometrija heksahedralne ćelije u slučaju trodimenzionalne mreže potpuno pravilna te je odnos ćelija mreže u potpunosti ortogonalan.

Nedostatak strukturirane mreže predstavlja otežanost ili nemogućnost izrade mreže zbog kompleksnosti geometrije. Nadalje, strukturirana mreža može zahtjevati znatno više elemenata nego nestrukturirana mreža za isti problem. Kako bi se ova dva nedostatka zaobišla koristi se hibridni (strukturirani/nestrukturirani) pristup koji dijeli složene geometrijske domene na manje dijelove koji podržavaju strukturiranu mrežu. Ovakav pristup još nije u

potpunosti automatiziran i zahtjeva dodatan rad korisnika kako bi se domena podijelila na manje dijelove.



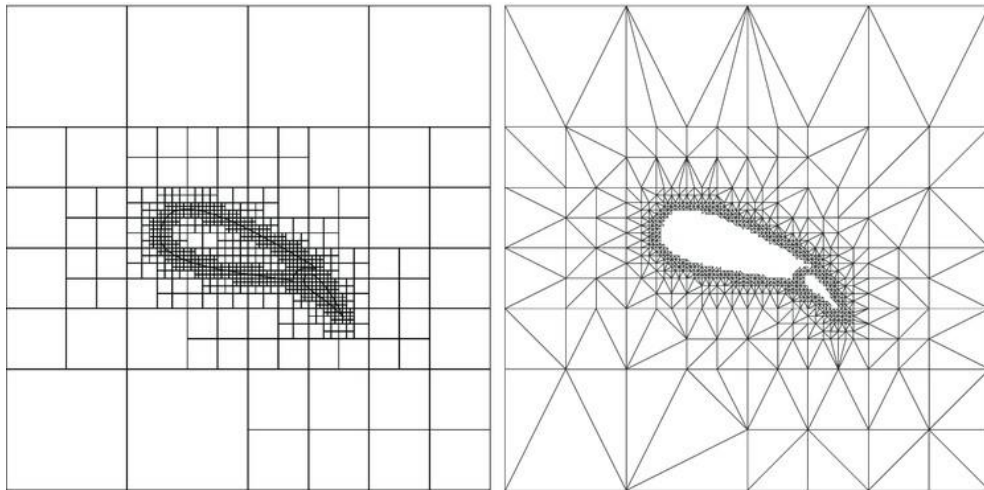
*Slika 4.3. Strukturirana mreža*

Za razliku od strukturirane mreže, nestrukturirana mreža ima veću fleksibilnost prilikom adaptacije na kompleksnu geometrijsku domenu, brzi porast od manjeg do većeg broja elemenata i lakše ugađivanje i ugrubljivanje mreže. Neki od osnovnih algoritama izrade nestrukturirane mreže su temeljeni na sljedećim metodama: Delaunayev metoda triangulacije, metoda ograničene Delaunayeve triangulacije i quadrees metoda.

Delaunayeva triangulacija za određeni set točaka je takva triangulacija da se nijedna točka iz seta ne nalazi unutar trokutu opisane kružnice. Na taj način se izbjegavaju izduženi, a postižu trokuti što sličniji jednakostraničnom trokutu, odnosno veća kvaliteta mreže.

Ograničena Delaunayeva triangulacija je nastavak na prethodnu triangulaciju koja uključuje zadane granice, kao što su određeni rubovi. Ti rubovi su zadani da ih se zadrži prilikom triangulacije, a uz pokušaj da ostanu Delaunayeva svojstva.

Quadrees je hijerarhijska struktura podataka koja djeli dvodimenzionalni prostor na četiri kvadranta. Prvo se cjelokupna geometrijska domena zatvori u kvadrat. Ta podjela domene “roditelja“ na domenu “djeteta“ se dešava sve dok se svaka najmanja ćelija ne spoji pravilno. Domena “roditelja“ se svaki put dijeli na četiri kvadrata. Po strukturi quadrees i Delaunayeva triangulacija su ekvivalentni. Moguća prednost ove metode naspram Delaunayeve triangulacije je da quadrees metoda stvara kvadratne ćelije što pospješuje brzinu i točnost realizacije simulacije, naspram trokutastih ćelija dobivenih Delaunayevom triangulacijom. Zbog kompleksnosti geometrije poligona različitih vegetacija u ovom radu će biti korištena nestrukturirana mreža za izradu simulacije.



Slika 4.4. *Quadtrees metoda i metoda Delaunayeve triangulacije za izradu mreže (Izvor: [13])*

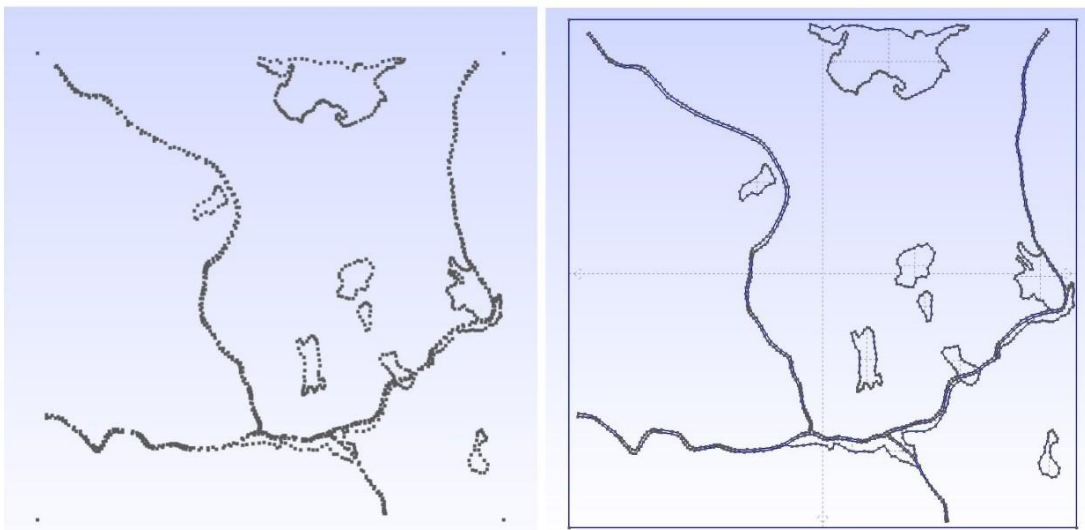
### 4.3. Izrada numeričke mreže za simulaciju požara

Postupak definiranja numeričke mreže za simulaciju širenja požara se sastoji od pre-processinga, izrade numeričke mreže i post-processinga.

Pre-processing uključuje prikupljanje podataka terena i uređivanje tih podataka na način da ih je moguće upotrijebiti. Podatke koje je potrebno prikupiti su četiri granične točke koje opisuju površinu terena na kojoj će simulacija biti provedena, skup ugušćenih točaka korišten za definiranje rubova poligona različitih vegetacija. Također je potrebno prikupiti točke elevacija pomoću DEM datoteke. Podatke je moguće prikupiti pomoću različitih GIS programa. Takvi prikupljeni podaci još nisu spremni za upotrebu jer su prikazani u geografskim koordinatama. Kako bi ih bilo moguće upotrijebiti za izradu mreže potrebno je interpolacijskim tehnikama iz geografskog koordinatnog sustava dobiti podatke u kartezijskom koordinatnom sustavu.

Izrada dvodimenzionalne numeričke mreže u programu GMSH započinje s vizualizacijom točaka. Vizualizacija točaka ostvarena je pozivanjem potrebne funkcije. Funkcija za dodavanje točaka zahtjeva parametre: x, y, z koordinate i veličinu mreže oko tih točaka. Sljedeći element koji je potrebno dodati su linije koje će određivati poligone vegetacija i rub površine terena. Funkcija za dodavanje linija zahtjeva unos prve i druge točke od koje je definirana linija. Redoslijed prve i druge točke je vrlo bitan kako bi se pravilno mogla odrediti zatvorena krivulja. Na primjer ukoliko želimo izraditi zatvorenu površinu od

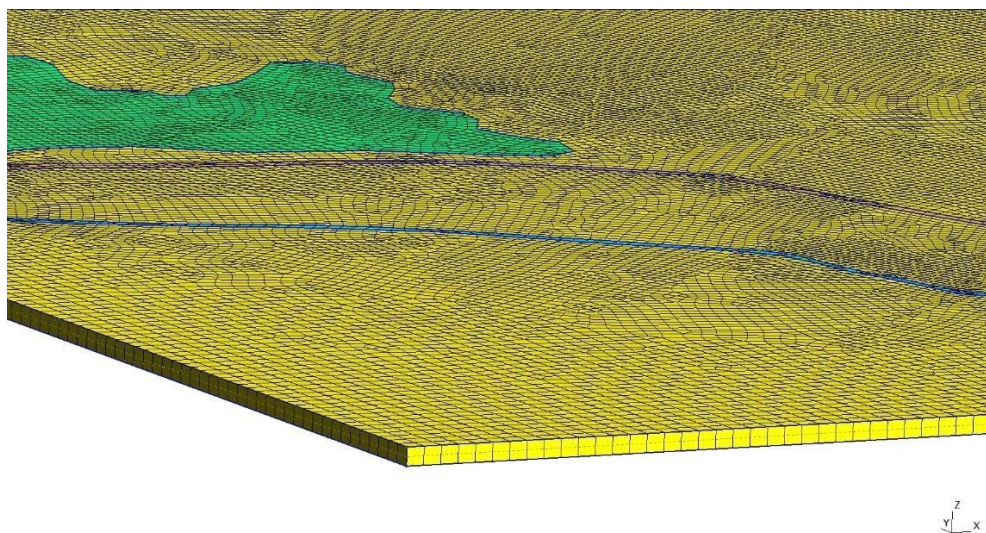
jednog kvadrata, linije koje čine kvadrat moraju biti poredane u nizu na način da je druga točka prethodne linije jednaka prvoj točki naredne linije (1-2, 2-3, 3-4, 4-1).



Slika 4.5. Vizualizirane točke i linije

Nakon definiranja linija, potrebno je odrediti zatvorenu krivulju koja opisuje površinu sastavljenu od niza tih linija. Na kraju se definira površina određena zatvorenom krivuljom, te se poziva funkcija za izradu i vizualizaciju mreže.

Iako je matematički model za simulaciju širenja požara dvodimenzionalan, OpenFOAM zahtjeva trodimenzionalne ćelije numeričke mreže. Kako bi se postigao dvodimenzionalni rezultat širenja, prvobitnu mrežu smo pomoću funkcije “extrude“ izdužili u smjeru osi Z za jedan sloj ćelija visine H.

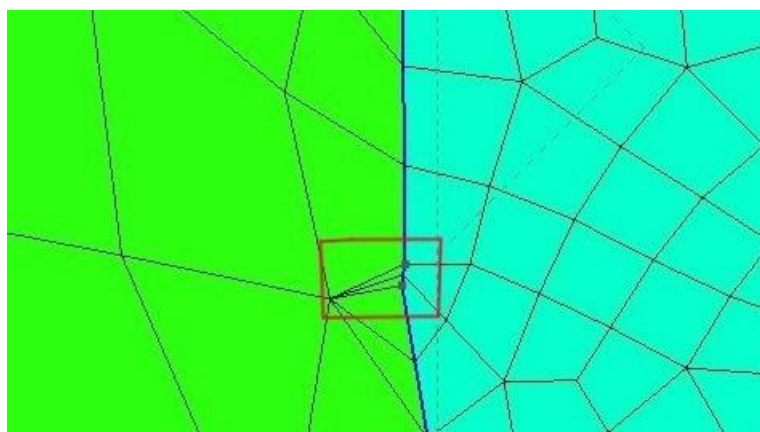


Slika 4.6. Trodimenzionalna mreža pogodna za OpenFOAM dobivena ekstrudiranjem 2D mreže



Zadnji postupak definiranja numeričke mreže obuhvaća dio post-processinga. Post-processing numeričke mreže za simulaciju širenja požara se sastoji od odabira odgovarajuće gustoće mreže za određena područja, podešavanje kvalitete mreže, odabir algoritama za izradu 2D i 3D mreže, definiranja fizikalnih površina i volumena i ispis mreže u odgovarajućem formatu.

Odabir odgovarajuće gustoće numeričke mreže će nam ovisiti primarno o geometriji poligona vegetacije. Cesta će biti prikazana pomoću puno užeg poligona za razliku od šuma. Stoga, kako bi mogli prikazati ponašanje požara prilikom dodira s cestom i da bi taj prikaz bio točniji, ugustit ćemo mrežu poligona ceste. O gustoći mreže će nam ovisiti i kvaliteta same mreže. Ukoliko se gustoća mreže pojedinih područja znatnije razlikuje, dovest će do izrade nepravilne mreže koja će biti neupotrebљiva za vršenje simulacije. Mreža izrađena u programu GMSH se importira u OpenFOAM. Osim kvalitete mreže koja se može odrediti u GMSH-u prikazane u poglavlju 4.1., bitno je obratiti pozornost i na zahtjeve kvalitete mreže OpenFOAM-a pozivom naredbe `checkMesh`. Zbog geometrijskih karakteristika nestrukturirane trodimenzionalne ravne mreže, provjera koja bi mogla odstupati u OpenFOAM-u za navedeni slučaj je provjera ne-ortogonalnosti ćelija. Mrežna ne-ortogonalnost predstavlja odstupanje paralelnosti normale susjednih ćelija izražena u kutovima. Primjer uzroka ne-ortogonalnosti s kojim se susrelo u ovom radu prilikom izrade mreže je neravnomjerna raspodjela točaka koje opisuju poligone vegetacije.



*Slika 4.7. Prikaz ne-ortogonalnosti ćelija kao posljedica male udaljenosti točaka*

Nakon što je definirana gustoća mreže za područja i provjerena kvaliteta, definiraju se fizikalni volumeni i fizikalne površine kojima će biti dodijeljeni parametri za simulaciju i mreža se sprema u obliku koji OpenFOAM podržava.

Tablica 4.1. Korišteni algoritmi pri izradi mreže

Korišteni algoritmi za izradu mreže			
2D algoritam	3D algoritam	Rekombinacijski algoritam	Subdivizijski algoritam
FrontalDelaunay for quads	Delaunay	Blossom	All quads

#### 4.4. Vizualizacija mreže odabranih područja

Odabrana područja na temelju kojih su izrađene numeričke mreže su: naselje Drenova u gradu Rijeka, područje u blizini grada Vareš u BiH i područje u blizini grada Belluno u Italiji.

Područje u blizini naselja Drenova odabrano za izradu prve simulacije širenja požara je veličine 2 km x 2 km. Vegetacija područja sadržava pretežno crnogoričnu šumu, nisko raslinje i kamenjar kroz koju se proteže cesta i rijeka Rječina. Koordinate područja su  $45^{\circ}21'52.08''S$  i  $14^{\circ}26'13.20''I$ .

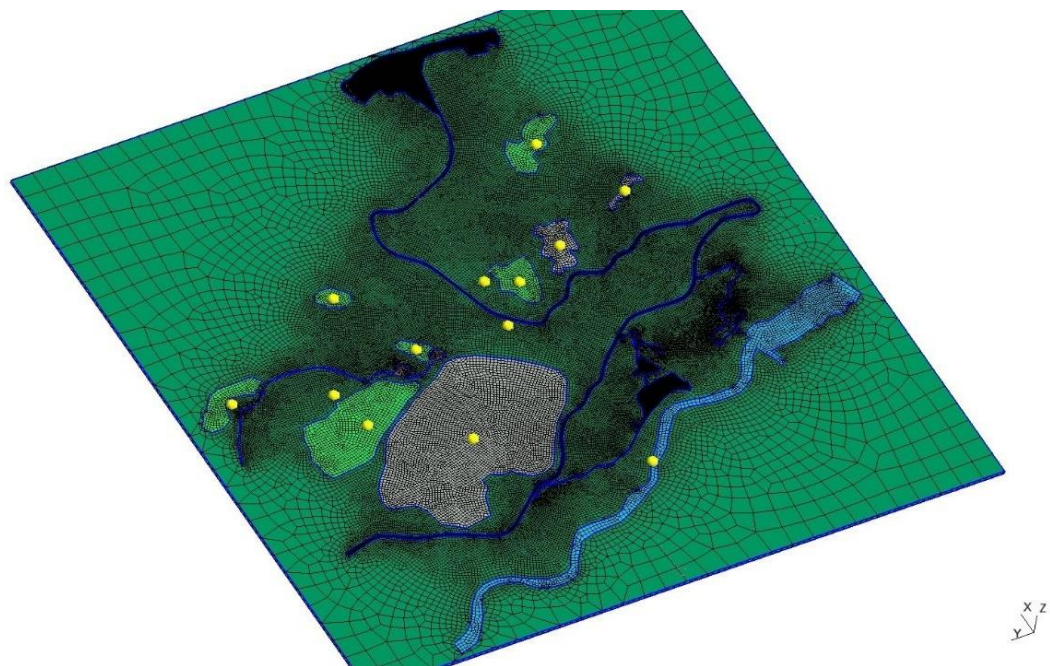


Slika 4.8. Domena simulacije širenja požara u blizini naselja Drenova

S obzirom na različitu vrstu geometrije poligona i vegetacije definirana je različita gustoća mreže. Broj za gustoću mreže predstavlja faktor s kojim se ukupna površina mreže množi gdje njihov umnožak predstavlja površinu jedne ćelije. Površina terena Drenova iznosi 2000 m x 2000 m, stoga odabirom faktora gustoće mreže od 0.002, površina jedna ćelije ceste iznosi 4 m x 4 m, površina jedne ćelije šumskog puta također iznosi 4 m x 4 m, itd.

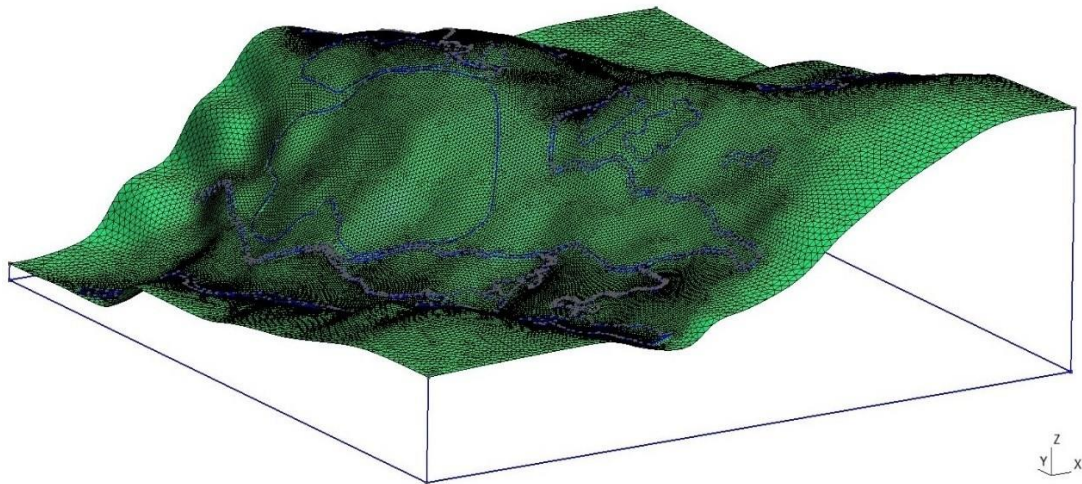
Tablica 4.2. *Gustoća mreže Drenova*

<b>Gustoća mreže</b>					
<b>Šuma</b>	<b>Nisko raslinje</b>	<b>Šumski put</b>	<b>Cesta</b>	<b>Rječina</b>	<b>Kamenjar</b>
0.07	0.005	0.002	0.002	0.007	0.005



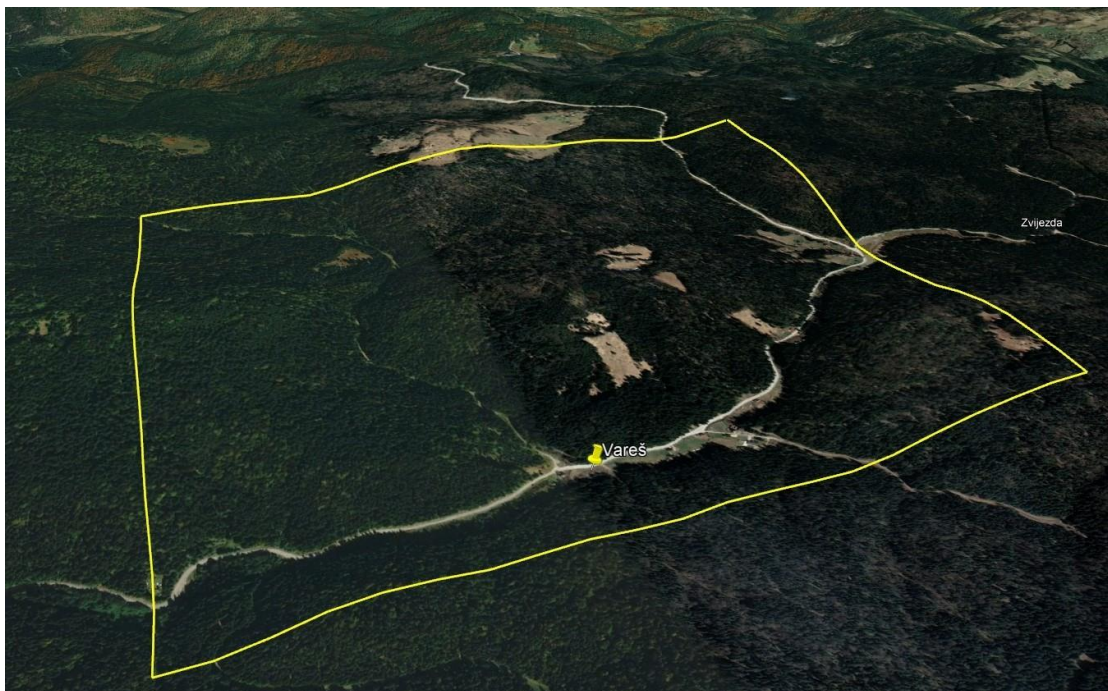
Slika 4.9. *Mreža područja Drenove*

Dodatna prednost korištenja programa za izradu mreže je mogućnost izrade koda u Pythonu pomoću kojeg je moguće vizualizirati plašt terena u trodimenzionalnom obliku.



*Slika 4.10. Trodimenzionalni prikaz terena*

Područje u blizini grada Vareš odabrano za izradu druge simulacije širenja požara je veličine 3 km x 3 km. Vegetacija je pretežno sastavljena od crnogorične šume razdvojene cestom i niskim raslinjem. Koordinate područja su  $44^{\circ}10'15.94''S$  i  $18^{\circ}23'48.92''I$

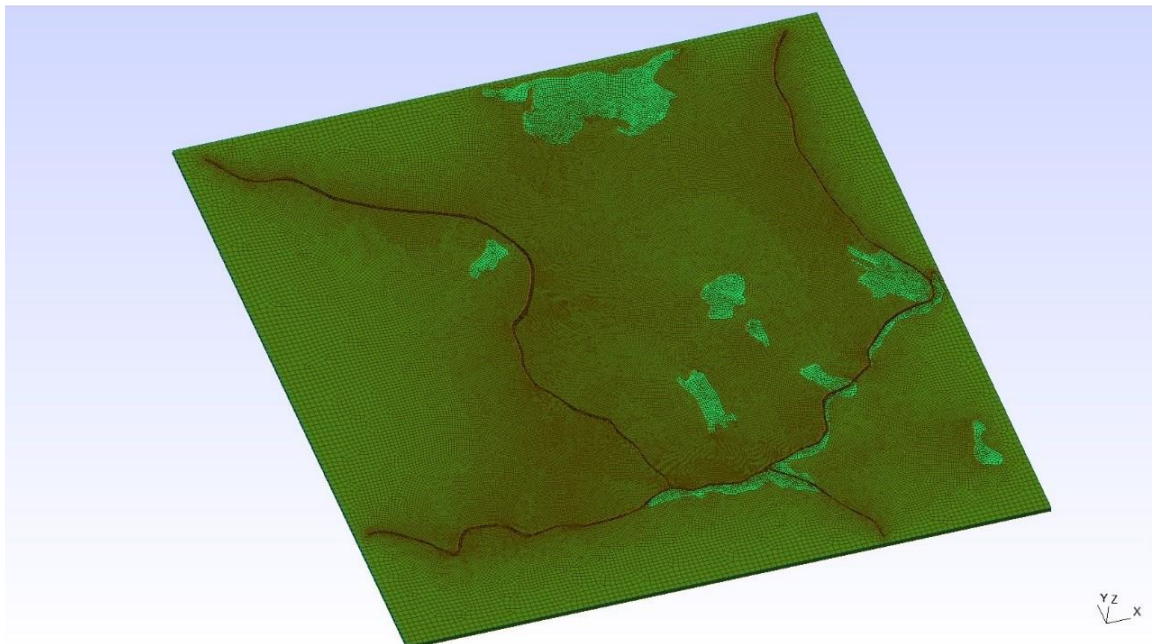


*Slika 4.11. Domena simulacije širenja požara u blizini grada Vareš*

Faktori gustoće mreže za pojedine poligone vegetacije područja terena Vareš dana je u tablici 4.3.

Tablica 4.3. *Gustoća mreže Vareš*

<b>Gustoća mreže</b>		
<b>Šuma</b>	<b>Nisko raslinje</b>	<b>Cesta</b>
0.025	0.016	0.009



Slika 4.12. *Mreža područja Vareš*

Područje u blizini grada Belluno, koje se nalazi stotinjak kilometara sjeverno od Venecije, odabrano je za izradu treće simulacije širenja požara. Područje je veličine 2.5 km x 2.5 km. Koordinate područja su 45°57'31.04"S i 12° 3'31.36"I

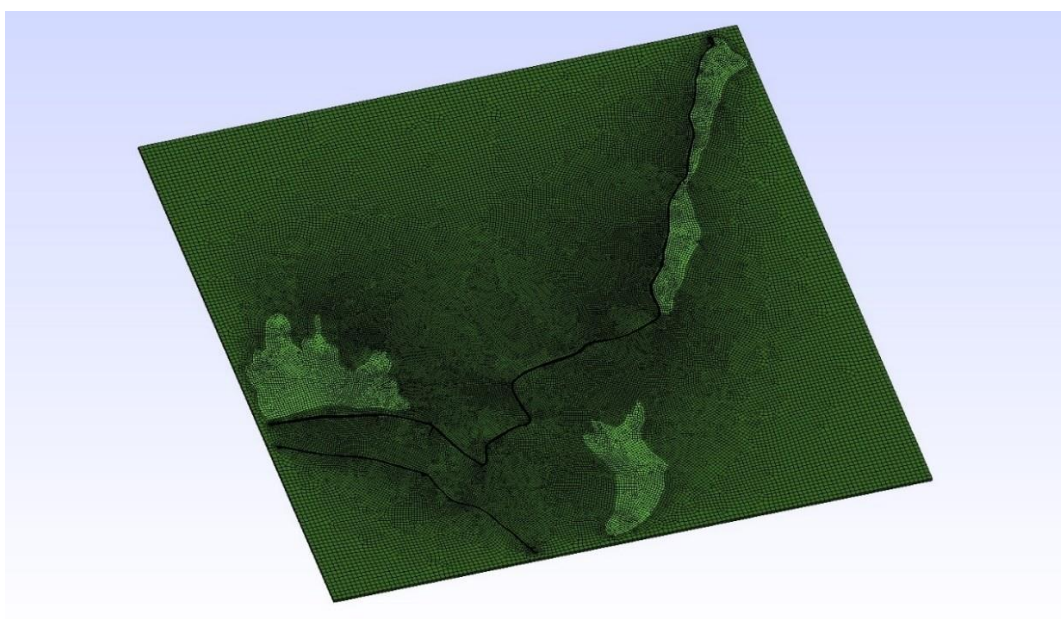


*Slika 4.13. Domena simulacije širenja požara u blizini grada Belluno*

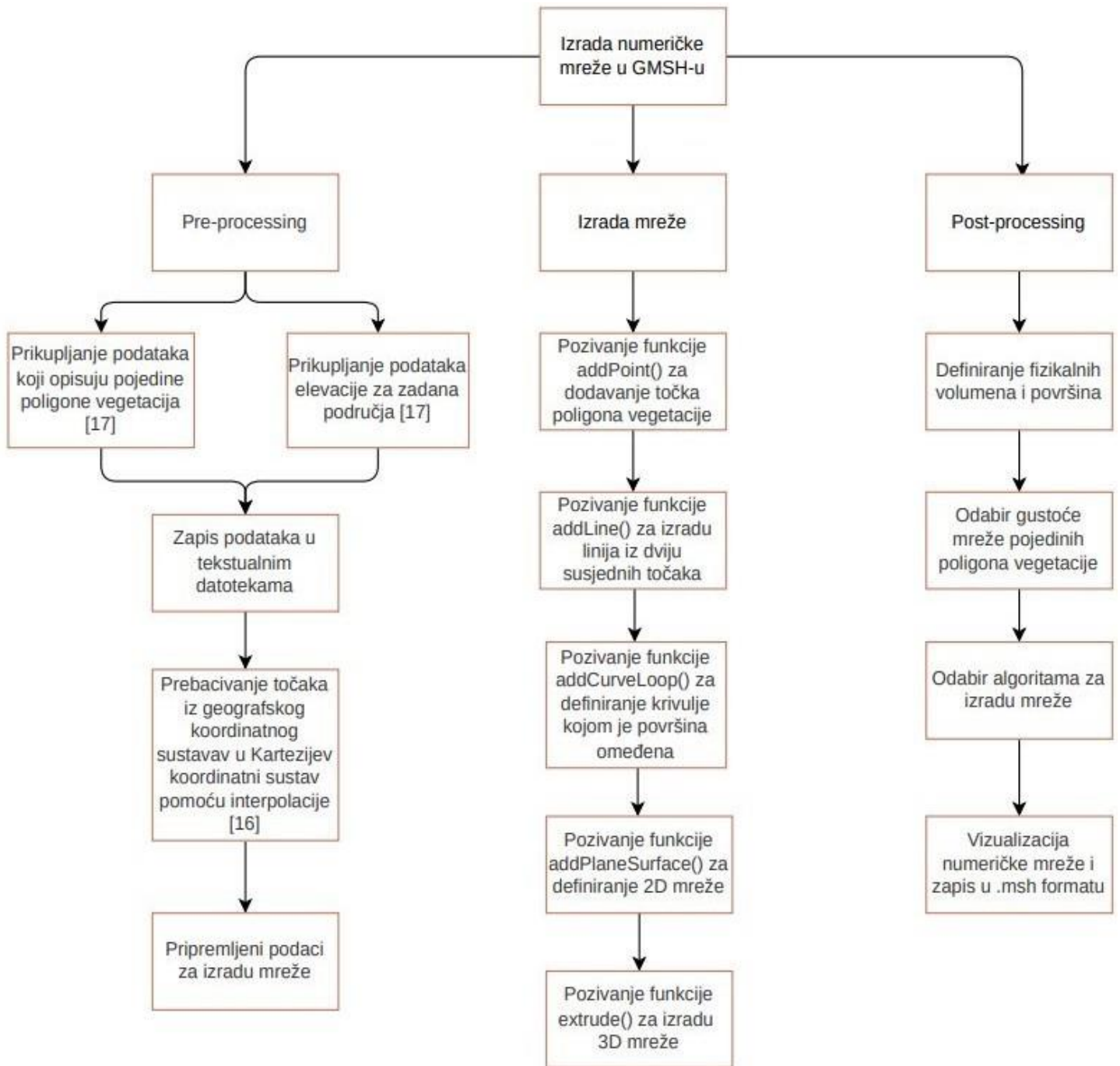
Gustoća mreže za pojedine poligone vegetacije područja terena Belluno dana je u tablici 4.4.

*Tablica 4.4. Gustoća mreže Belluno*

<b>Gustoća mreže</b>		
<b>Šuma</b>	<b>Nisko raslinje</b>	<b>Cesta</b>
0.015	0.012	0.008



*Slika 4.14. Mreža područja Belluno*



Slika 4.15. Tok pripreme i izrade numeričke mreže u GMSH-u

## 5. Izrada simulacije širenja požara

Simulacija širenja požara izrađena je u programu OpenFOAM. OpenFOAM je program pisan u programskom jeziku C++. Korišten je za razvoj numeričkih rješavača i najčešće za rješavanje problema računarske dinamike fluida. Parametri koji će biti korišteni za izradu simulacije se zapisuju u tekstualnim datotekama, strukturom koju program zahtjeva, te se naredbe za izradu mreže, zadavanje parametara odgovarajućim grupama i vizualizaciju zadaju u konzoli operativnog sustava. U nastavku će biti opisan način određivanja vrijednosti parametara pojedinih područja simulacije i vizualizacija rezultata simulacije na tim područjima.

### 5.1. Odabir vrijednosti parametara modela

Parametre koje je potrebno odrediti kako bi model bio spreman za simulaciju širenja požara:

$k$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] – Termalna difuzivnost

$A$  [ $\text{Ks}^{-1}$ ] – Porast temperature u sekundama pri maksimalnoj brzini sagorjevanja, s potpunim dostupnim gorivom i bez prisutnog hlađenja

$B$  [K] – Koeficijent proporcionalnosti u modificiranom Arrheniusovom zakonu

$C$  [ $\text{K}^{-1}$ ] – Koeficijent konvekcije prema okolini

$C_s$  [ $\text{s}^{-1}$ ] – Brzina relativne potrošnje goriva

$k_w$  [/] – Koeficijent advekcije vjetra

$k_s$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] – Koeficijent advekcije terena

S obzirom na različitu vrstu i gustoću vegetacije područja odabranih za simulaciju, razlikovati će se i vrijednosti parametara koji ovise o vegetaciji.

#### 5.1.1. Vrijednosti parametara naselja Drenova

Naselje Drenova nalazi se u Hrvatskoj, u blizini grada Rijeka. Ovo područje je karakteristično za vegetaciju koja je tipična za primorska i mediteranska područja, ali također ima elemente kontinentalne vegetacije zbog specifične mikroklimе i nadmorske visine. Vrsta vegetacije koja prevladava su Mediteranski borovi, makija, i livade. Klima naselja Drenova je submediteranska što znači da ima blage i vlažne zime, a suha i topla ljeta.



Tablica 5.1. Vrijednosti parametara za naselje Drenova

Parametar	Vrijednost parametara					
	Cesta/naselje:	Borova šuma:	Nisko raslinje:	Šumski put:	Kamenjar	Rječina
$k$	0,05 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,15 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,05 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,05 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,05 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,05 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$k_w$	0,1	0,025	0,1	0,1	0,1	0,1
$k_s$	0,1 ms <sup>-1</sup>	0,1 ms <sup>-1</sup>	0,1 ms <sup>-1</sup>	0,1 ms <sup>-1</sup>	0,1 ms <sup>-1</sup>	0,1 ms <sup>-1</sup>
$A$	0 Ks <sup>-1</sup>	250 Ks <sup>-1</sup>	150 Ks <sup>-1</sup>	100 Ks <sup>-1</sup>	150 Ks <sup>-1</sup>	0 Ks <sup>-1</sup>
$B$	570 K	570 K	570 K	570 K	570 K	570 K
$C$	0,00002 K <sup>-1</sup>	0,00002 K <sup>-1</sup>	0,00002 K <sup>-1</sup>	0,00002 K <sup>-1</sup>	0,00002 K <sup>-1</sup>	0,00002 K <sup>-1</sup>
$C_s$	0 s <sup>-1</sup>	0,13 s <sup>-1</sup>	0,17 s <sup>-1</sup>	0,2 s <sup>-1</sup>	0,2 s <sup>-1</sup>	0 s <sup>-1</sup>
$S$	0	0,75-1	0,5-1	0,2-0,6	0-0,5	0

### 5.1.2. Vrijednosti parametara u blizini grada Vareš

Grad Vareš se nalazi u središnjem dijelu Bosne i Hercegovine. Ovo područje bogato je raznolikom vegetacijom zahvaljujući kombinaciji planinskog reljefa, umjereno kontinentalne klime i bogatog tla. Od šumske vegetacije pevladavaju bukove i hrastove šume. Iznad šumskog pojasa često se nalaze livade, a na rubovima šuma i u nižim predjelima raste grmlje i nisko raslinje. Klima je umjereno-kontinentalna s hladnim zimama i toplim ljetima.

Tablica 5.2. Vrijednosti parametara u blizini grada Vareš

Parametar	Vrijednosti parametara		
	Listopadna šuma:	Nisko raslinje:	Cesta:
$k$	0,15 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,05 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,05 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$k_w$	0,025	0,1	0,1
$k_s$	0,1 ms <sup>-1</sup>	0,1 ms <sup>-1</sup>	0,1 ms <sup>-1</sup>
$A$	250 Ks <sup>-1</sup>	150 Ks <sup>-1</sup>	0 Ks <sup>-1</sup>
$B$	570 K	570 K	570 K
$C$	0,00002 K <sup>-1</sup>	0,00002 K <sup>-1</sup>	0,00002 K <sup>-1</sup>
$C_s$	0,13 s <sup>-1</sup>	0,17 s <sup>-1</sup>	0 s <sup>-1</sup>
$S$	0,75-1	0,5-1	0

### 5.1.3. Vrijednosti parametara u blizini grada Belluno

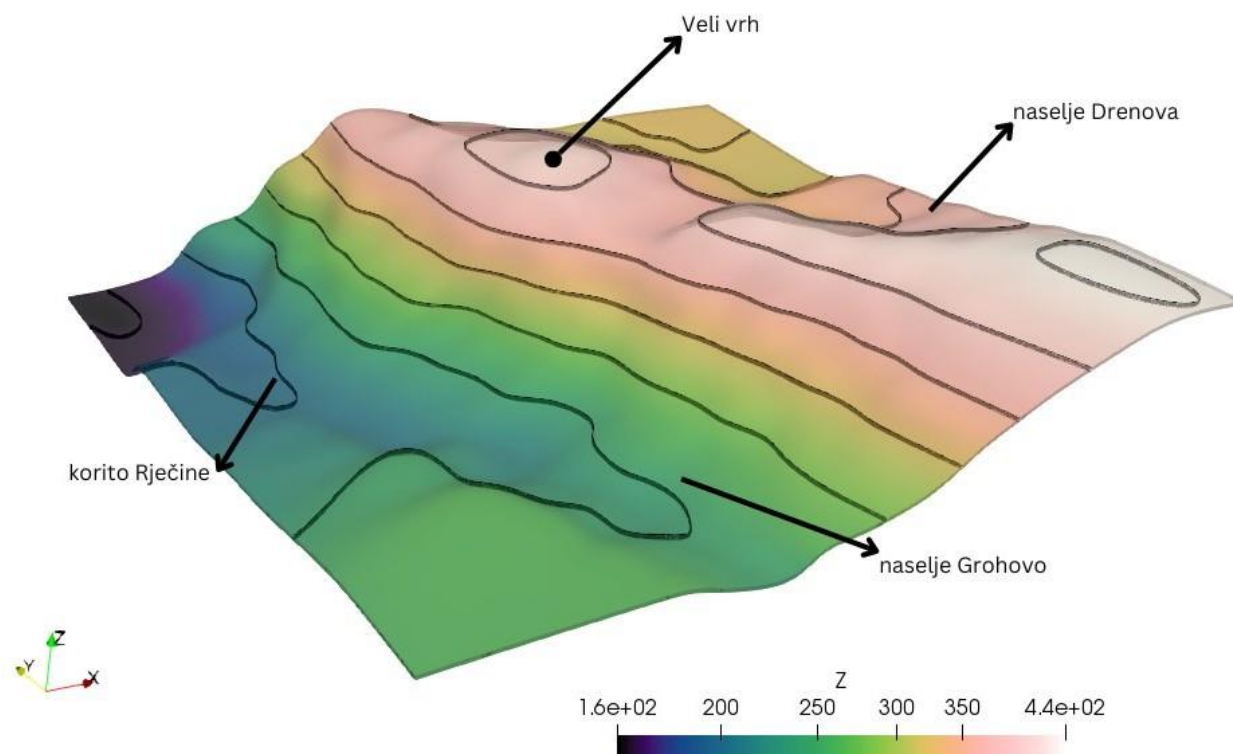
Belluno je grad smješten u regiji Veneto u sjeveroistočnoj Italiji, u podnožju Dolomita. Ovo područje karakterizira raznolika vegetacija koja varira od planinskih šuma do alpskih livada. Borove šume su karakteristične za niže nadmorske visine, bukove šume za srednje nadmorske visine, a smreka za više nadmorske visine. Osim šuma na alpskim padinama oko Belluna nalaze se raznolike alpske livade i nisko raslinje. Belluno slično kao Vareš ima umjereno-kontinentalnu klimu s hladnim zimama i toplim ljetima.

Tablica 5.3. Vrijednosti parametara u blizini grada Belluno

Parametar	Vrijednosti parametara		
	Šuma smreke:	Nisko raslinje:	Cesta:
$k$	0,15 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,05 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	0,05 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$k_w$	0,025	0,1	0,1
$k_s$	0,1 ms <sup>-1</sup>	0,1 ms <sup>-1</sup>	0,1 ms <sup>-1</sup>
$A$	250 Ks <sup>-1</sup>	150 Ks <sup>-1</sup>	0 Ks <sup>-1</sup>
$B$	570 K	570 K	570 K
$C$	0,00002 K <sup>-1</sup>	0,00002 K <sup>-1</sup>	0,00002 K <sup>-1</sup>
$C_s$	0.13 s <sup>-1</sup>	0,17 s <sup>-1</sup>	0 s <sup>-1</sup>
$S$	0,75-1	0,5-1	0

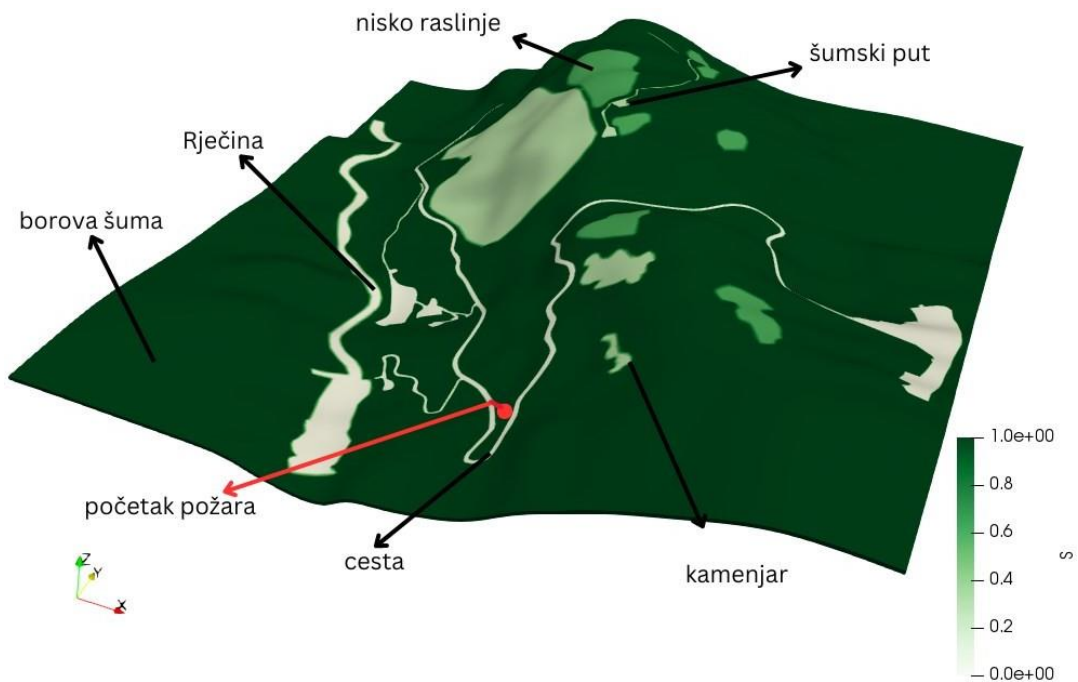
## 5.2. Vizualizacija rezultata simulacije širenja požara terena Drenova

Teren naselja Drenova na kojem se izvodi prva simulacija širenja požara ima raspon elevacije od 160 metara do 440 metara. Visinska razlika među izohipsa je 30 metara.



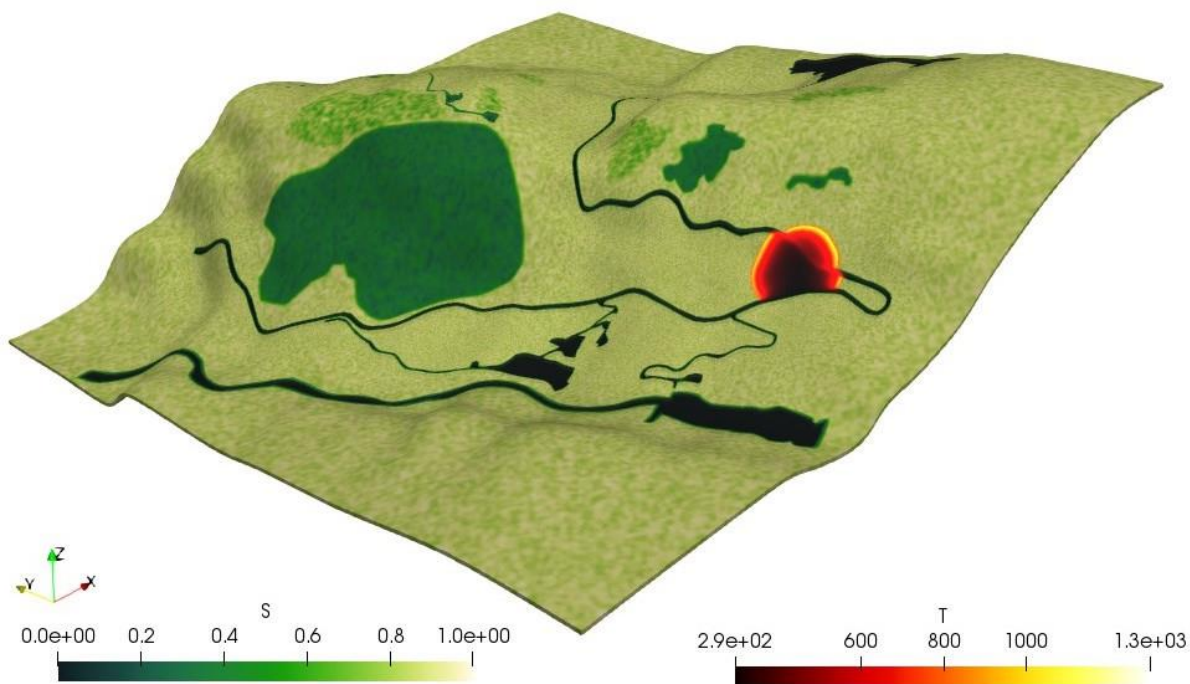
Slika 5.1. Reljef terena Drenova

Udio dostupnog goriva ovisan o vrsti vegetacije i početna točka požara prikazane su na slici 5.2. Kao izvor požara pretpostavljen je bačeni opušak.

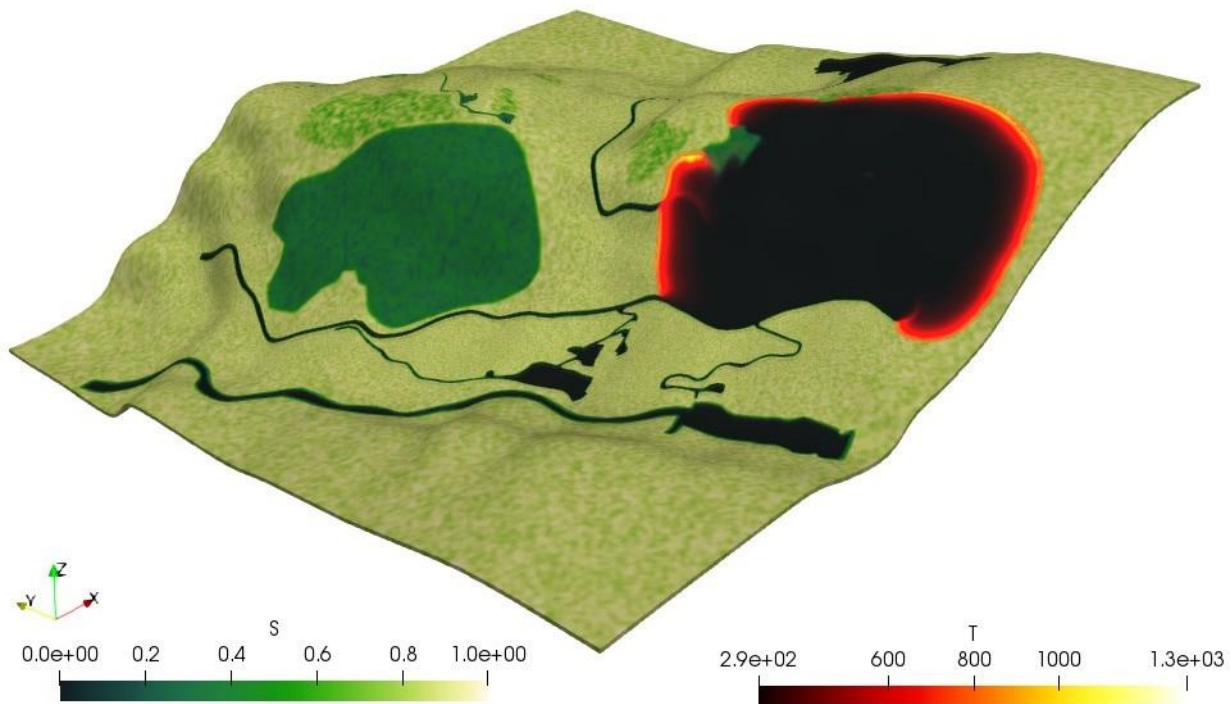


Slika 5.2. Prikaz vegetacije naselja Drenova

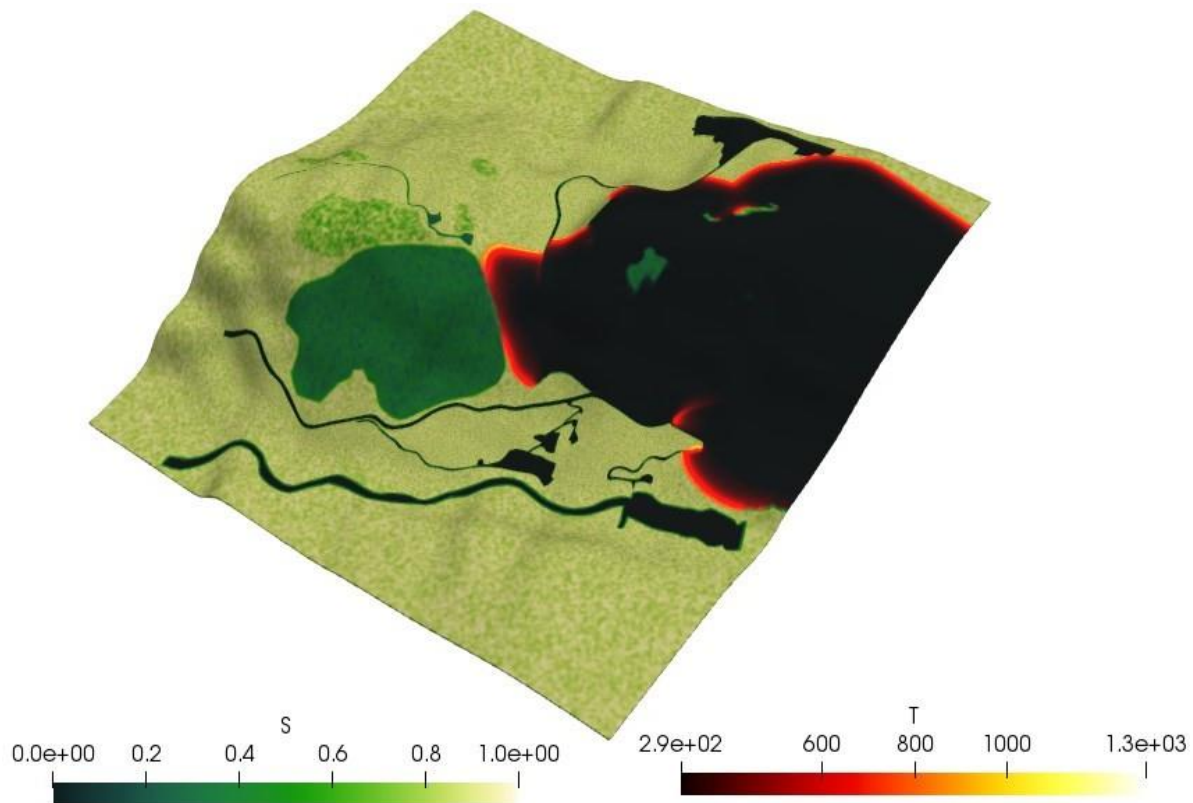
Pretpostavljena je početna temperatura tla i temperatura okoline od 22°C. Početna temperatura uzeta je kao prosječna temperatura tog područja tokom dana. Slučaj širenja požara je razmatran pod utjecajem sjeverozapadnog vjetrova brzine 5 m/s, a ukupno trajanje simulacije iznosi 2 sata i 15 minuta. Rezultati simulacije prikazani su slikama 5.3.-5.5.



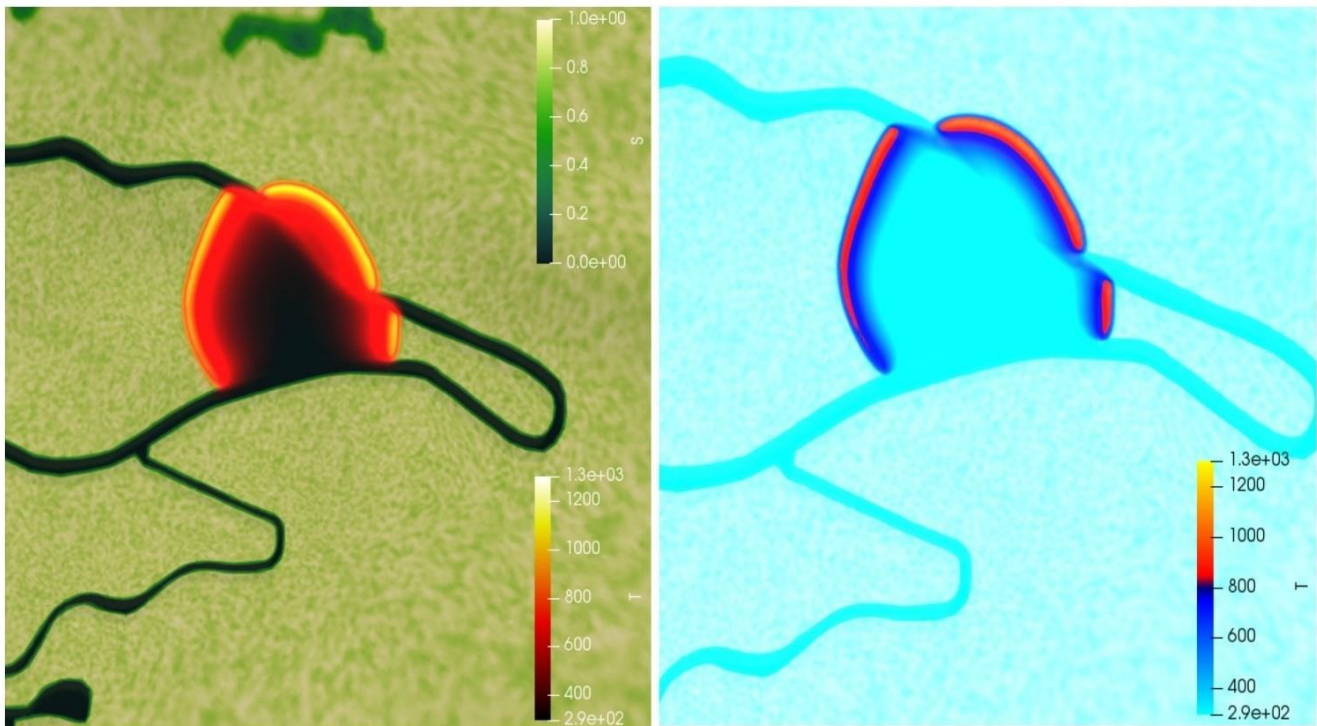
Slika 5.3. Napredak požara u 20 min



*Slika 5.4. Napredak požara u 1h i 15 min*



*Slika 5.5. Napredak požara u 2h i 15 min*

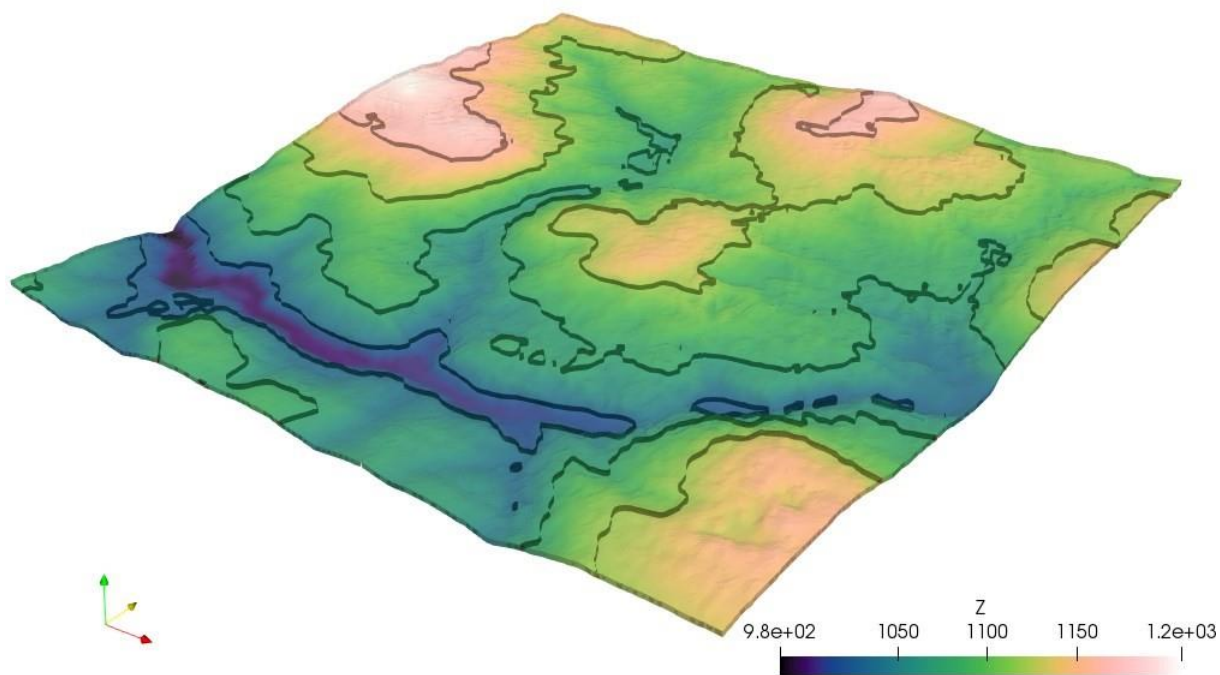


*Slika 5.6. Razdvajanje fronte požara zbog prelaska ceste unutar 15 minuta simulacije (lijevo je prikazana temperatura i vegetacija, desno samo temperatura)*

Na slici 5.6. prikazan je prelazak požara preko ceste i razdvajanje fronte glavnog požara na 3 samostalne fronte zbog utjecaja ceste na širenje požara. Razdvajanje fronte požara, potpomognuto utjecajem vjetra, uzrokovalo je povećanje površine dostupne požaru za širenje, gdje je razornost tog efekta prikazana slikom 5.5.

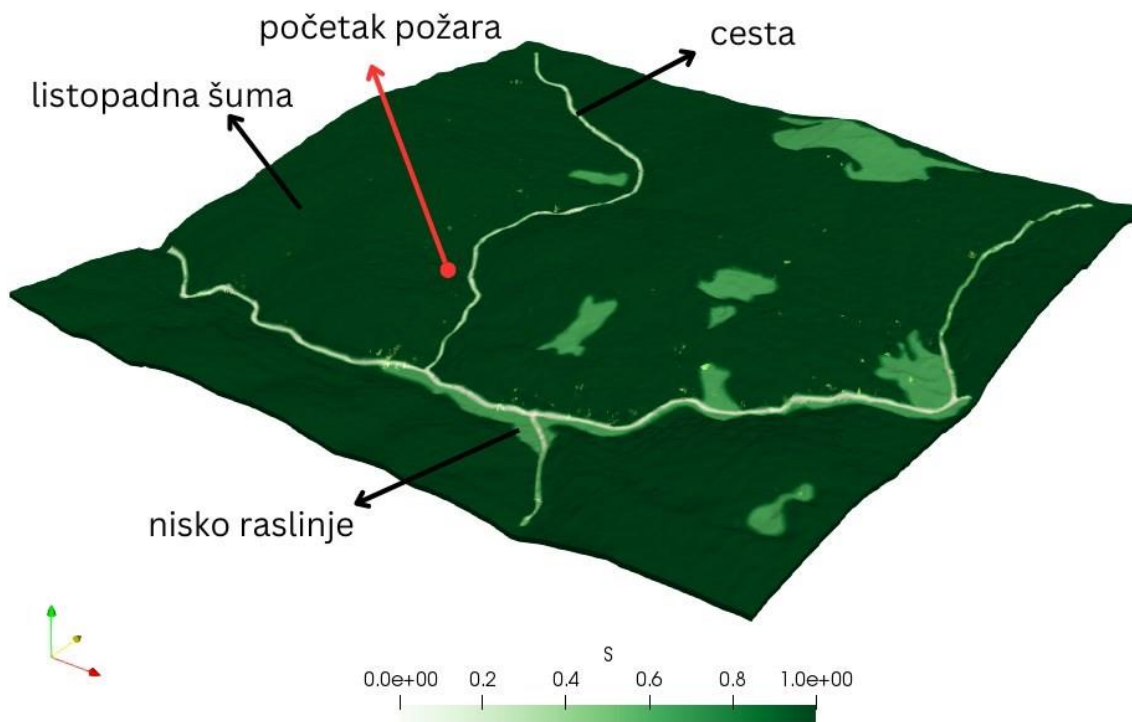
### **5.3. Vizualizacija rezultata simulacije širenja požara terena Vareš**

Teren u blizini grada Vareš na kojem se izvodi druga simulacija širenja požara ima raspon elevacije od 980 do 1200 metara. Visinska razlika između izohipsa iznosi 50 metara.



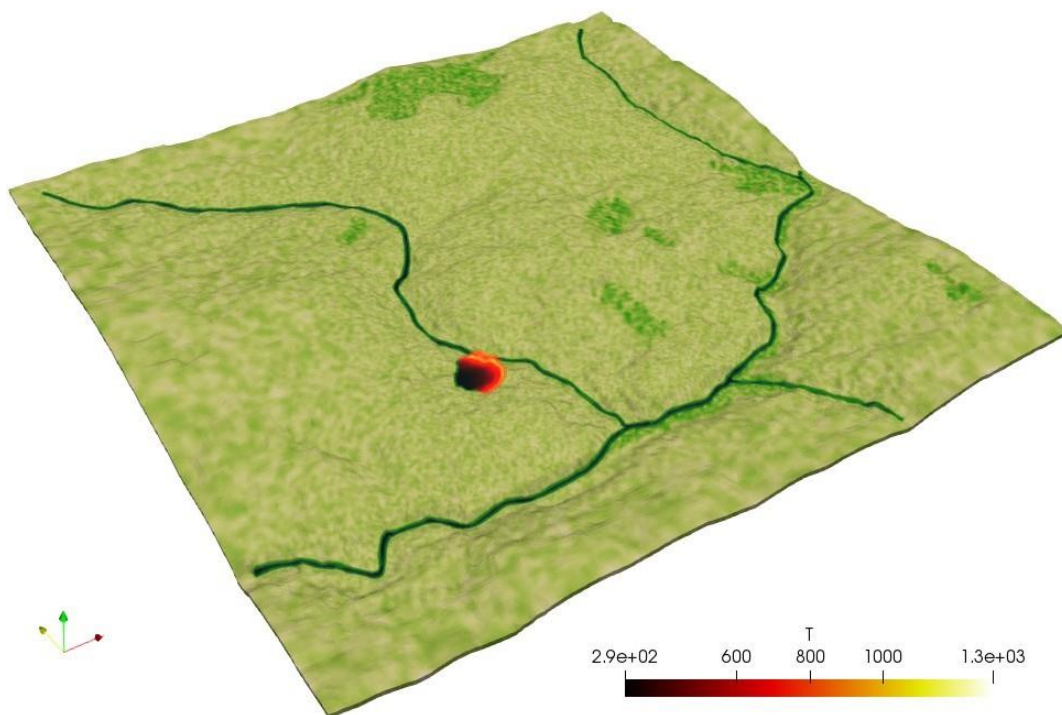
Slika 5.7. Reljef terena u blizini grada Vareš

Udio dostupnog goriva ovisan o vrsti vegetacije i početna točka požara prikazane su na slici 5.8. Kao izvor požara pretpostavljena je neugašena logorska vatra.

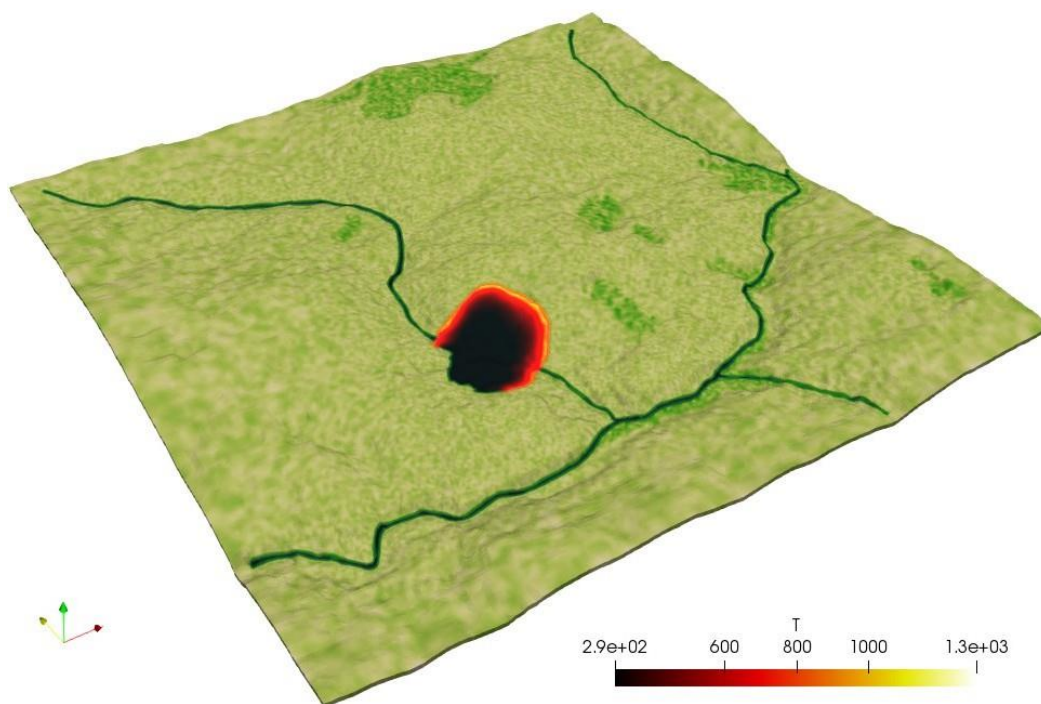


Slika 5.8. Prikaz vegetacije u blizini grada Vareš

Pretpostavljena je početna temperatura tla i temperatura okoline od 24°C. Početna temperatura uzeta je kao prosječna temperatura tog područja tokom dana. Slučaj širenja požara je razmatran pod utjecajem zapadnog vjeta brzine 5 m/s, a ukupno trajanje simulacije iznosi 2 sata. Rezultati simulacije prikazani su slikama 5.9.-5.12.

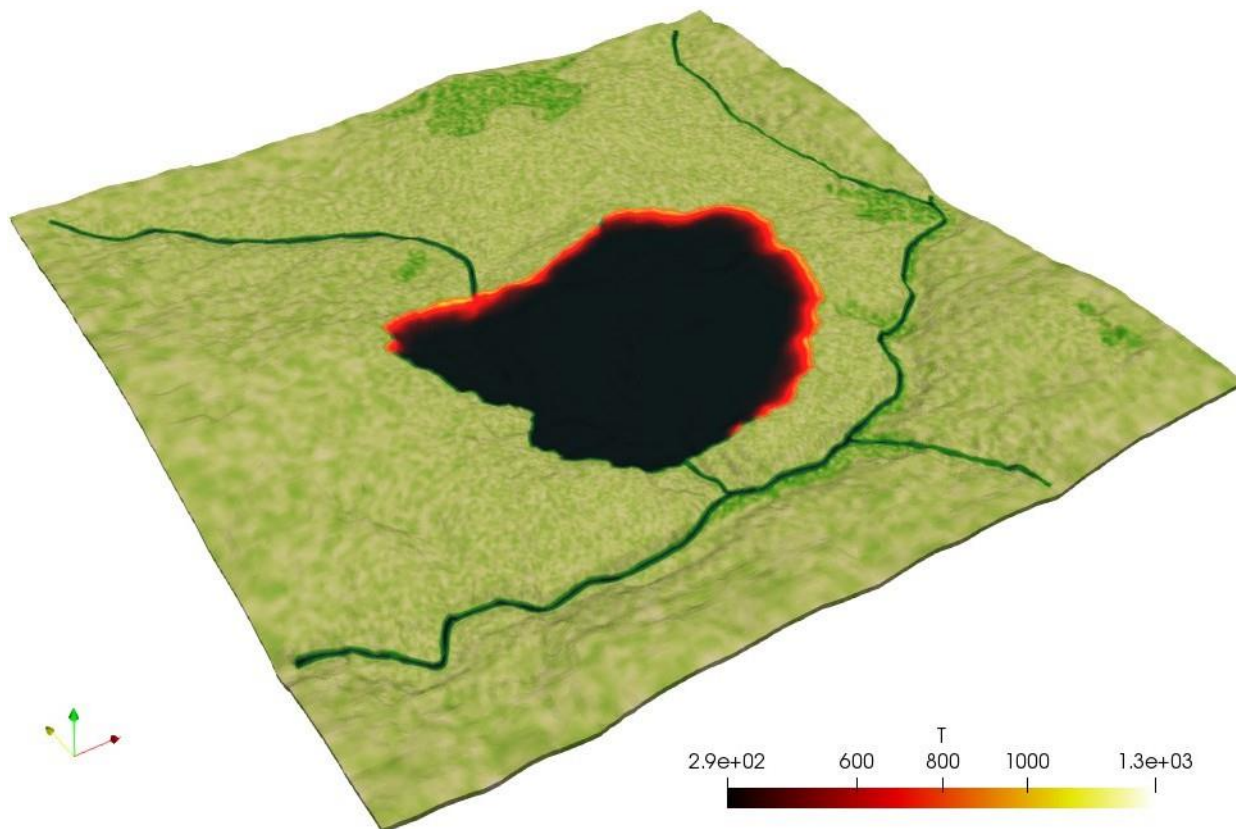


*Slika 5.9. Napredak požara u 15 min*

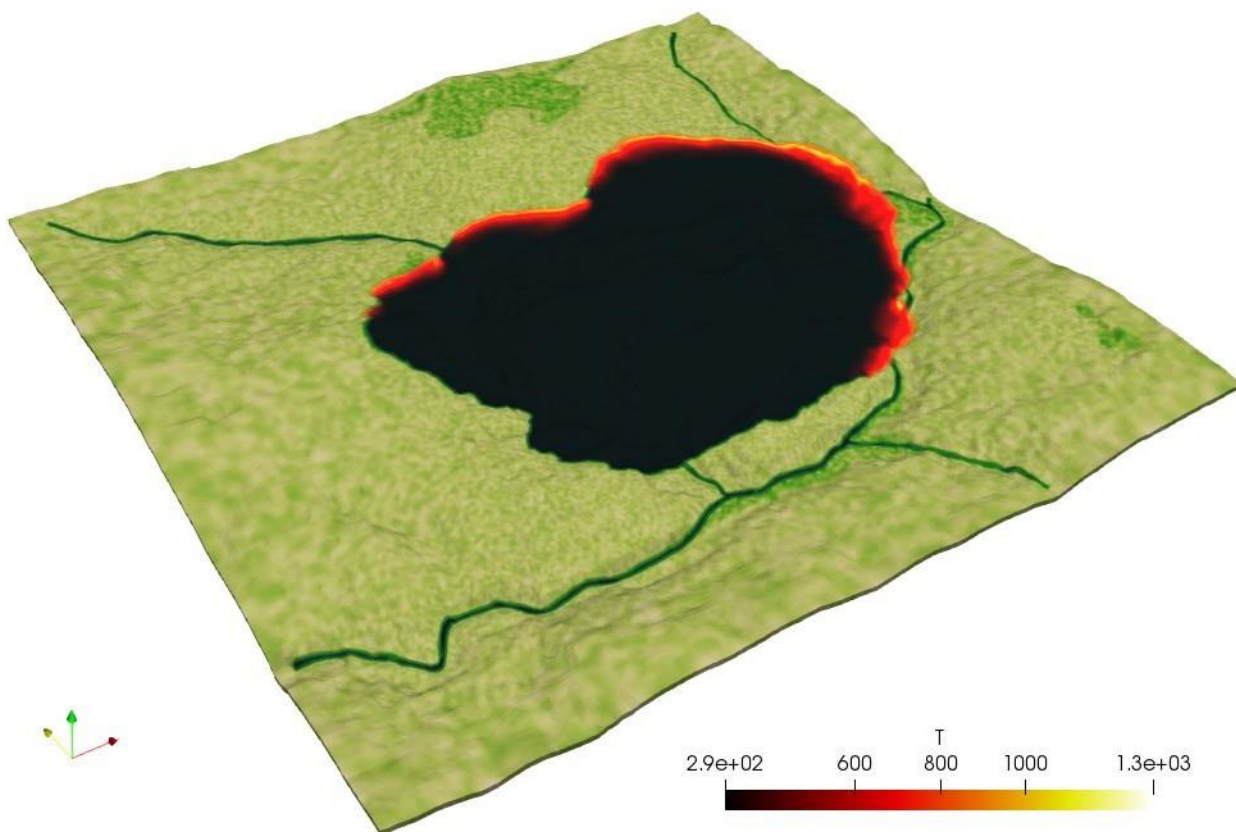


*Slika 5.10. Napredak požara u 30 min*

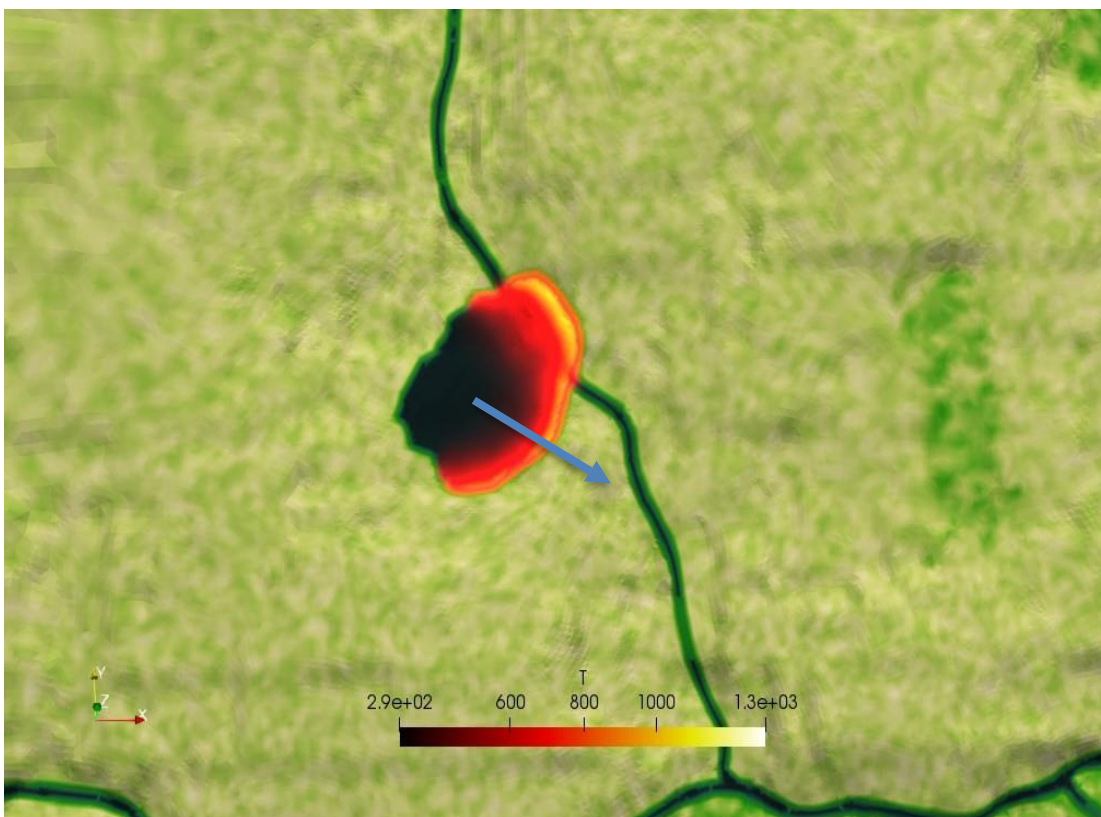




*Slika 5.11. Napredak požara u 1h i 25 min*



*Slika 5.12. Napredak požara u 1h i 55 min*

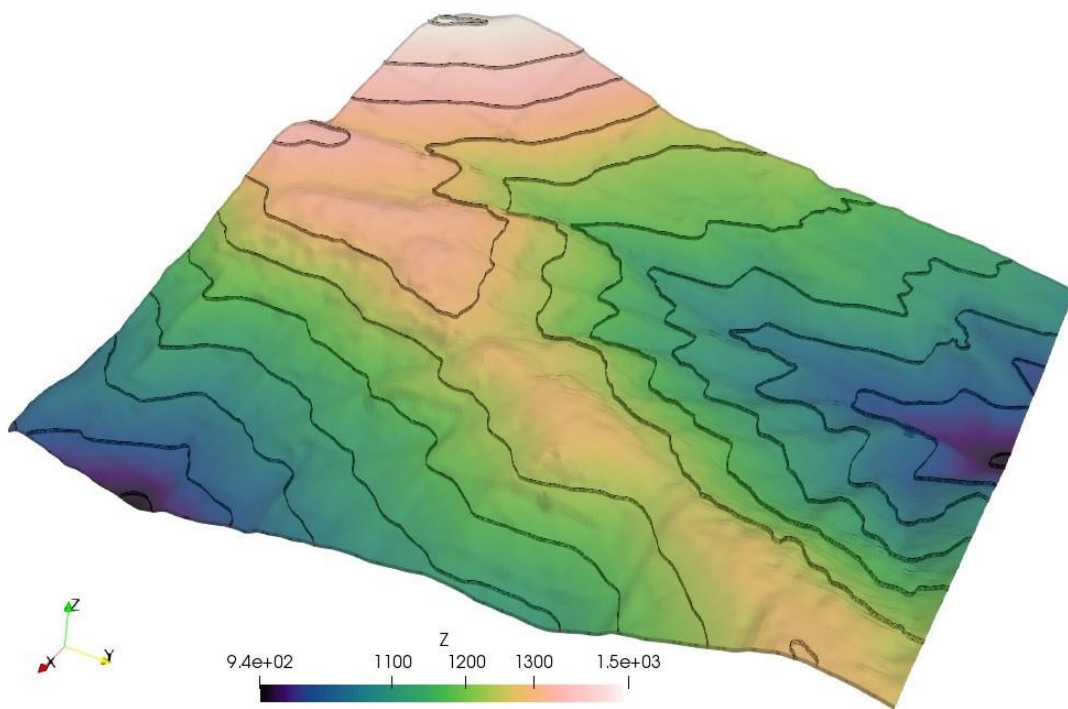


*Slika 5.13. Utjecaj vjetra na širenje požara*

Na slici 5.13. prikazano je širenje vatrene fronte pod utjecajem vjetra u smjeru plave strelice. Vidljivo je da se požar ne može širiti u smjeru suprotnom smjeru vjetra unatoč pozitivnom gradijentu terena, što je očekivano ponašanje zbog usporavanja širenja vatre koje vjetar uzrokuje. U tom smjeru temperatura opada, što dodatno ukazuje na smanjenje intenziteta požara. Ovaj efekt je uzrokovan time što vjetar odvodi toplinu i gorive plinove od vatrene fronte, čime se smanjuje mogućnost zapaljenja novih područja. Slika jasno prikazuje kako vjetar može značajno utjecati na dinamiku požara, ograničavajući njegovo širenje i smanjujući temperaturu u područjima izloženim vjetru.

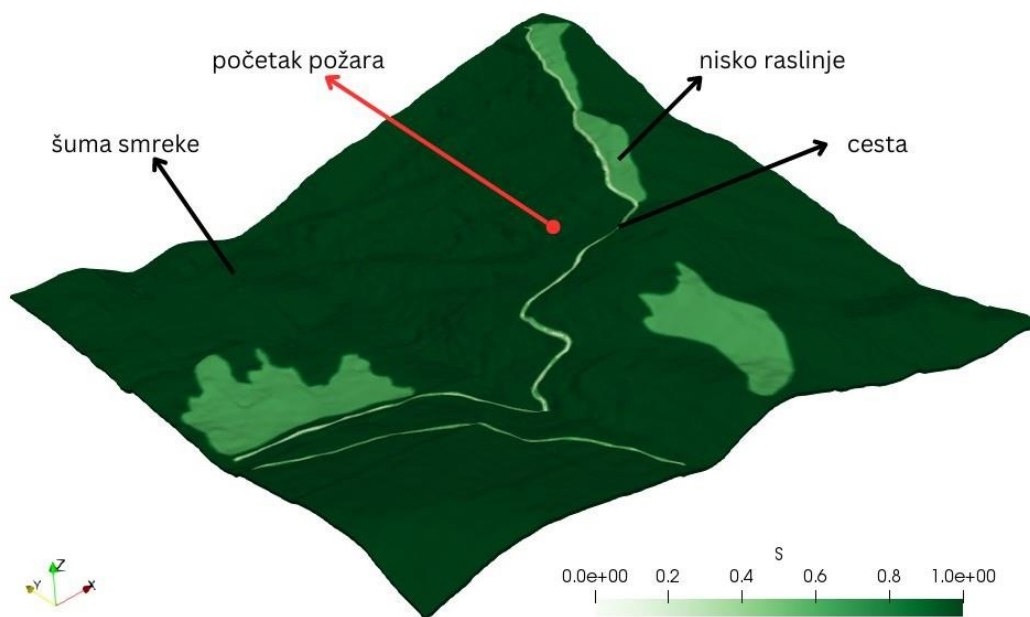
#### **5.4. Vizualizacija rezultata simulacije širenja požara terena Belluno**

Teren u blizini grada Belluno na kojem se izvodi treća simulacija širenja požara ima raspon elevacije od 940 do 1500 metara. Visinska razlika između izohipsa iznosi 50 metara.



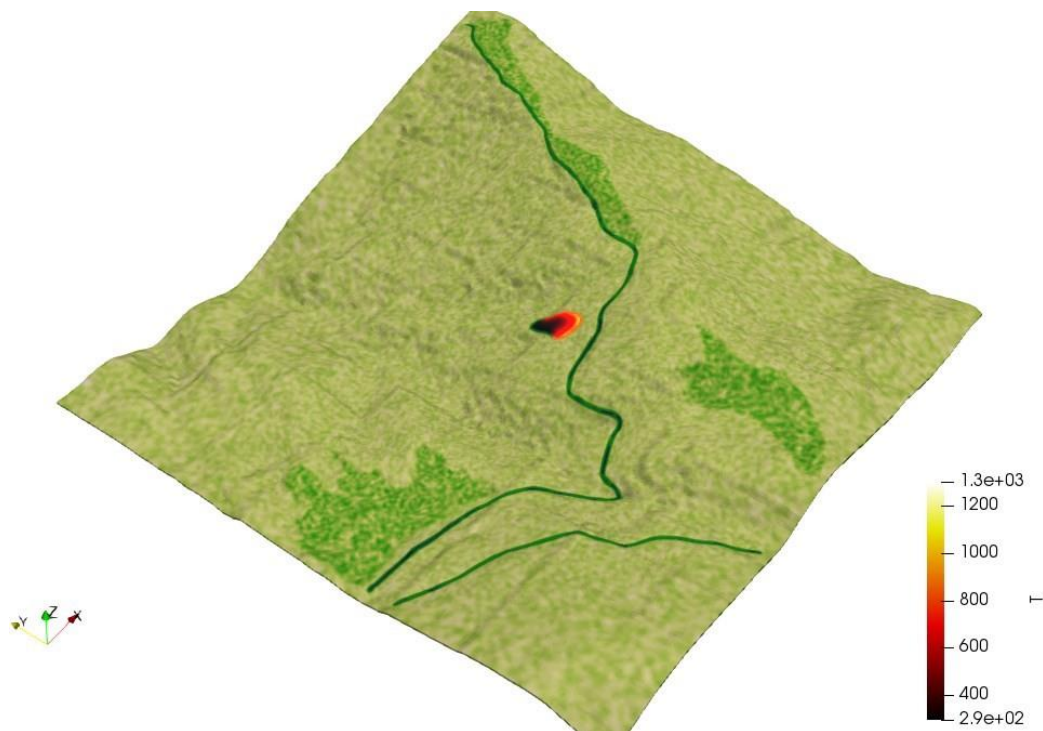
Slika 5.14. Reljef terena u blizini grada Belluno

Udio dostupnog goriva ovisan o vrsti vegetacije i početna točka požara prikazane su na slici 5.15. Kao izvor požara pretpostavljen je udar munje.

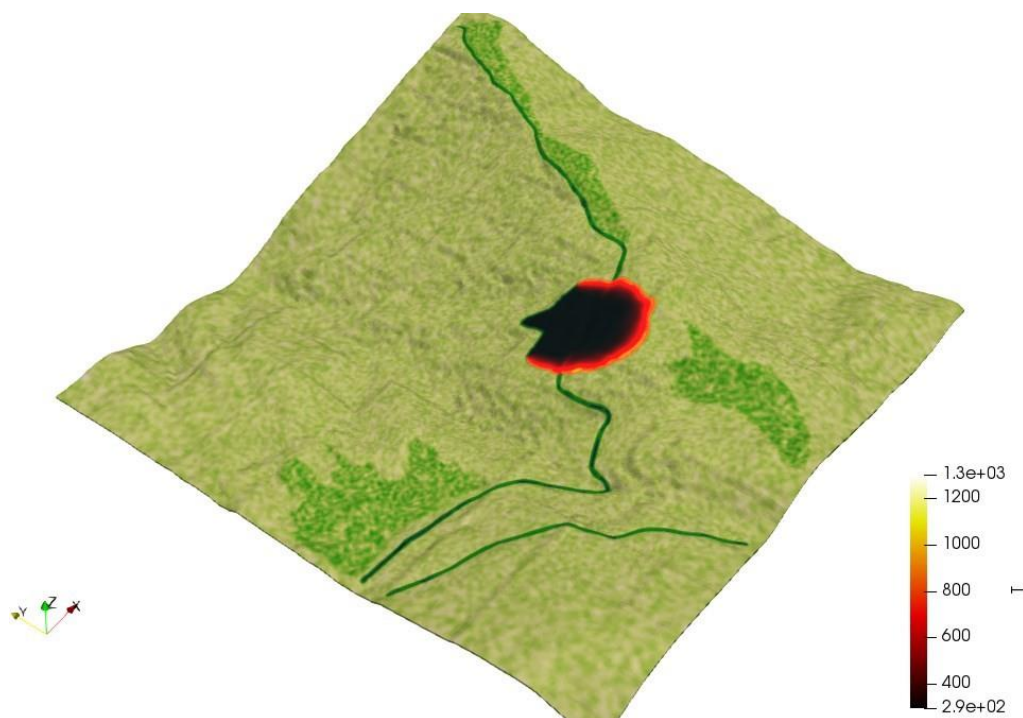


Slika 5.15. Prikaz vegetacije terena Belluno

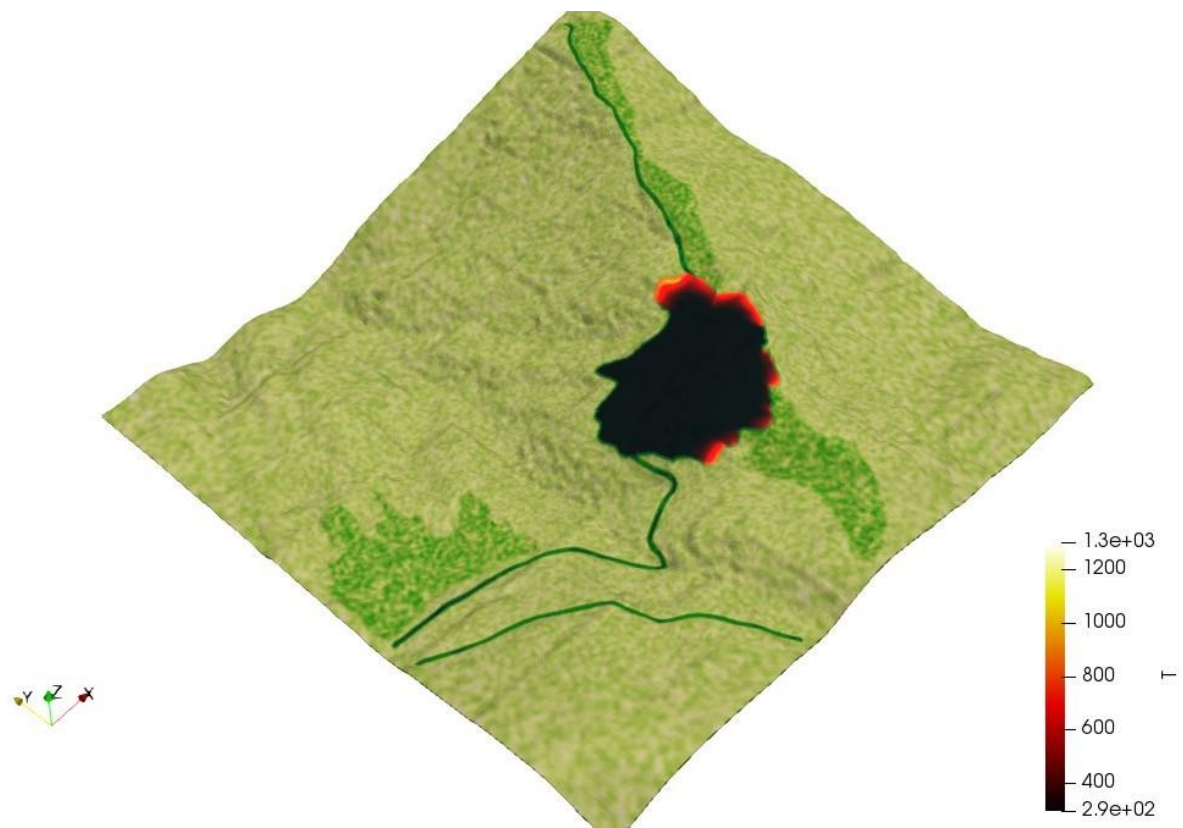
Pretpostavljena je početna temperatura tla i temperatura okoline od 21°C. Početna temperatura uzeta je kao prosječna temperatura tog područja tokom dana. Slučaj širenja požara je razmatran bez utjecaja vjetra. Ukupno trajanje simulacije iznosi 2 sata. Rezultati simulacije prikazani su slikama 5.16.-5.19.



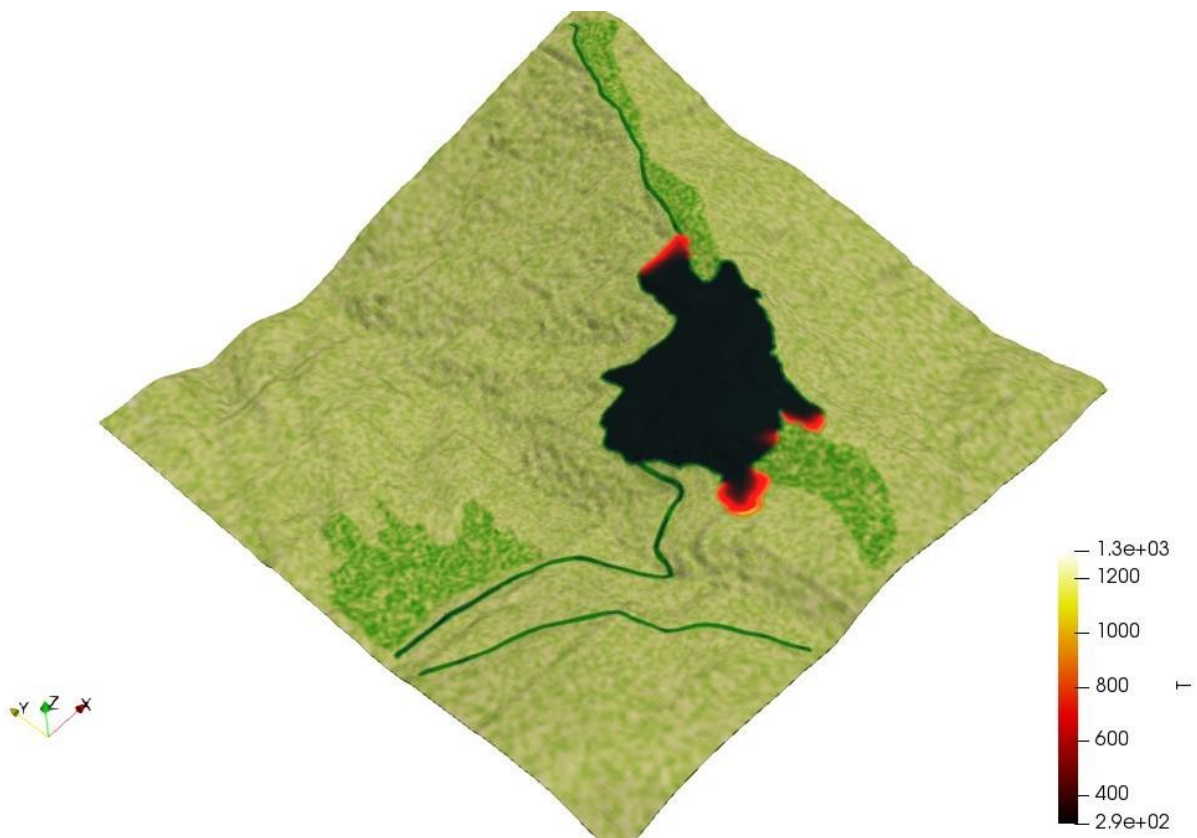
Slika 5.16. Napredak požara u 12 min



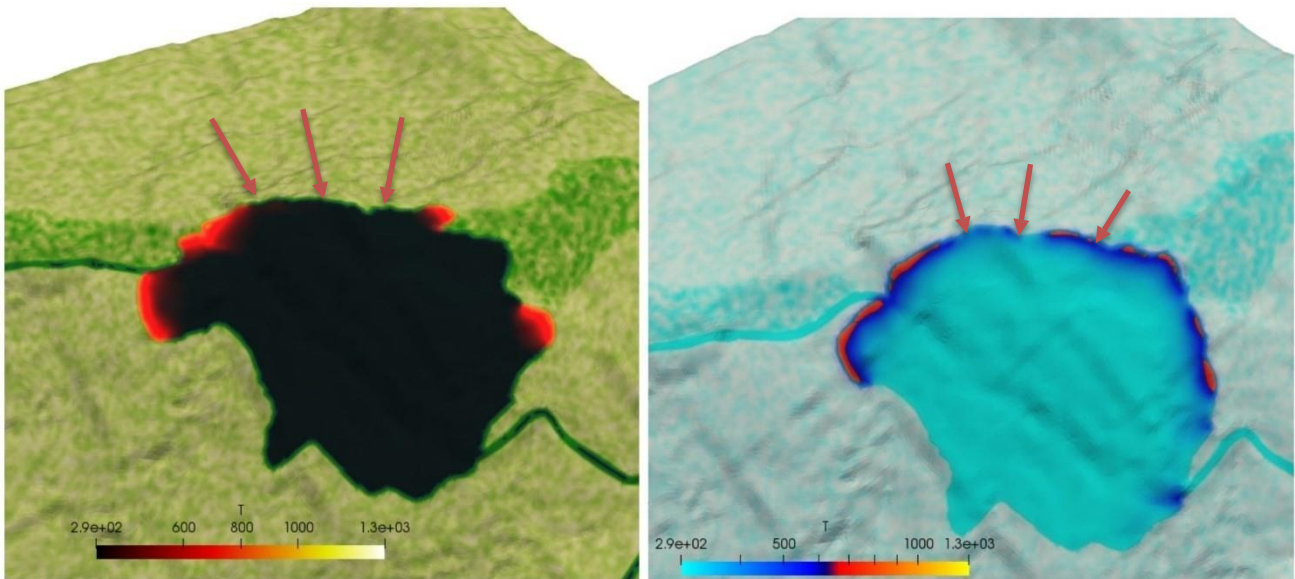
Slika 5.17. Napredak požara u 40 min



*Slika 5.18. Napredak požara u 1h i 10 min*



*Slika 5.19. Napredak požara u 1h i 45 min*



*Slika 5.20. Zaustavljanje požara na vrhu brijega*

Na slici 5.20. vidljivo je da se požar prestaje širiti kada dođe do vrha brijega (označeno crvenim strelicama) zbog negativnog gradijenta elevacije. U tom smjeru temperatura opada, što dodatno ukazuje na smanjenje intenziteta požara. Ovaj efekt je uzrokovan time što se vatra teže širi nizbrdo zbog gravitacije i smanjenog dotoka goriva. Simulacija jasno pokazuje kako topografija, posebno elevacija, može značajno utjecati na dinamiku požara, ograničavajući njegovo širenje nizbrdo i smanjujući temperaturu u područjima s negativnim gradijentom.

## 6. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada bio je izrada i priprema numeričke mreže u svrhu izrade simulacije širenja požara. Korišten je matematički model širenja požara koji omogućuje simuliranje različitih fenomena koji su mogući u šumskim požarima te uzima u obzir različite karakteristike vegetacije. Vrijednosti parametara korištenih u simulaciji prilagođeni su s obzirom na vrstu vegetacije koje opisuju. Odabrana su tri područja za simulaciju širenja požara: naselje Drenova u gradu Rijeka, područje u blizini grada Vareš u Bosni i Hercegovini i područje u blizini grada Belluno u Italiji.

Numerička mreža je izrađena i pripremljena u programu GMSH pomoću Python API, a definiranje mreže se sastojalo od prikupljanja i obrade podataka za opis terena, izrade same mreže, ugađivanja i vizualizacije. Iako je strukturirana mreža superiornija s obzirom na uštedu memorije, korištena je nestrukturirana mreža zbog kompleksnosti geometrije. Korištenje programa za izradu mreže se pokazalo korisno i vremenski efikasno prilikom konstruiranja simulacije širenja požara, te su mogućnosti prilagođavanja mreže veće nego prilikom izrade mreže u OpenFOAM alatima.

Matematički modeli temeljeni na fizikalnim zakonitostima su rješavani u programu OpenFOAM u kojem se učitala izrađena mreža i vrijednosti parametara širenja požara. Dvodimenzionalni matematički model korišten za simulaciju širenja požara dao je zadovoljavajuća rješenja. Uspješno su prikazana teorijski opisana karakteristična svojstva širenja požara poput: povećanje brzine i inteziteta požara u smjeru povećanja gradijenta elevacije, razdvajanje fronte požara uslijed dodira s cestom, usporavanje i prekid požara u smjeru smanjenja gradijenta elevacije i povećanje temperature vatre prilikom utjecaja vjetra.

Napredak za izradu i pripremu numeričke mreže postoji, a temeljio bi se na razvijanju programa zaduženih za izradu mreže. Od velike koristi bi bila automatizacija izrade hibridne mreže koja bi objedinila prednosti strukturirane mreže u obliku manjeg zauzimanja memorije i konačno bržih simulacija te prednosti nestrukturiranih mreža prilikom prilagođavanja kompleksnoj geometriji. Napredak vezan uz izradu simulacije širenja požara bio bi postignut povećanjem točnosti prikupljenih podataka. Trenutno najveća odstupanja točnosti su vezana uz točnost vegetacije i vjetra. Povećanje razine točnosti bi mogli postići ukoliko bi postojali podaci koji prikazuju točni raspored vrste vegetacije u zadanom području i njegovu gustoću te brzinu i smjer širenja vjetra u stvarnom vremenu.

## LITERATURA

- [1] The Washington post: “Extreme Heat wreaking havoc with hottest month“, s Interneta, <https://www.washingtonpost.com/weather/2023/06/06/extreme-weather-heat-oceans-climate-asia-canada/>
- [2] U.S department of agriculture: “Prescribed Fire in the Northwest“, s Interneta, <https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/northwest/topic/prescribed-fire-northwest>
- [3] Copernicus: “ESOTC 2022 Europe Wildfires“, s Interneta, <https://climate.copernicus.eu/esotc/2022/wildfires>
- [4] Copernicus: “ESOTC 2023 Europe Wildfires“, s Interneta, <https://climate.copernicus.eu/esotc/2023/wildfires>
- [5] T. Senčić, V. Mrzljak, Toplinski strojevi i uređaji, (2023).
- [6] Newberry, Brooklynn & Power, Collin & Abreu, Rodolfo & Durigan, Giselda & Rossatto, Davi & Hoffmann, William. (2020). Flammability thresholds or flammability gradients? Determinants of fire across savanna–forest transitions.
- [7] Ontario: “Wildland fire behaviour“, s Interneta, <https://www.ontario.ca/page/wildland-fire-behaviour>
- [8] Schwab, James & Meck, S. & Simone, J.. (2005). Planning for wildfires. 1-124.
- [9] Pyregence: “Coupled Weather–Wildland Fire Modeling“, s Interneta, <https://pyregence.org/extreme-weather-and-wildfire-ct/wildfire-simulations/>
- [10] Mandel, J. i dr.: “A wildland fire model with data assimilation“, Mathematics and Computers in Simulation, (2008).
- [11] M. Buljan: Računalna simulacija širenja požara (2019).
- [12] Christophe Geuzaine, Jean-Francois Remacle, Gmsh Reference Manual, (2024).
- [13] Lisboa, Adriano. (2008). Delaunay refinement for curved complexes.
- [14] R. Skejo: Računalna simulacija širenja šumskih požara na području otoka Ugljana (2019).
- [15] G. Marvin: Računalna simulacija širenja šumskih požara na području otoka Pašmana (2019).
- [16] S. Ivić, J. Škifić, S. Družeta, B. Crnković, M. Tuhtan, L. Grbčić, I. Lučin, M. Čavrak: Računarsko inženjerstvo uz programski jezik Python, (2023).
- [17] QGIS Development Team(2024). QGIS Geographic Information System (Verzija 3.2) [softver]. Open Source Geospatial Foundation Project <https://qgis.org>



## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Veliki požar šume (Izvor: [1]) .....	2
Slika 2.2. Kontrolirani požar (Izvor: [2]).....	3
Slika 2.3 Izgorene površine u Europi i Mediteranu u 2023.g. (Izvor: [3]) .....	4
Slika 2.4 Količina opožarene površine po mjesecima u 2023. godini (Izvor: [3]) .....	5
Slika 2.5 Požari proteklih godina (Izvor: [4]).....	5
Slika 2.6. Emisija CO <sub>2</sub> uzrokovana šumskim požarima (Izvor: [4]).....	6
Slika 2.7 Elementi potrebni za izgaranje .....	6
Slika 2.8 Karakteristika požara ovisna o vegetaciji (Izvor: [6]) .....	7
Slika 2.9. Podzemni požar (Izvor: [7]).....	8
Slika 2.10. Površinski požar (Izvor: [7]).....	8
Slika 2.11. Požar krošnje (Izvor: [7]).....	9
Slika 2.12. Vjetar, razlika temperature i vlažnost (Izvor: [6]) .....	10
Slika 2.13. Utjecaj vjetra i terena na širenje vatre (Izvor: [8]).....	11
Slika 2.14. Pyregence (program koji koristi CAWFE model širenja) (Izvor: [9]).....	12
Slika 3.1. Prikaz funkcije $f(T)$ (Izvor: [10]).....	16
Slika 4.1. Prikaz mreže izrađene u GMSH-u (Izvor: [12]).....	19
Slika 4.2. Vizualizacija kvalitete mreže.....	20
Slika 4.3. Strukturirana mreža .....	21
Slika 4.4. Quadrees metoda i metoda Delaunayeve triangulacije (Izvor: [13]).....	22
Slika 4.5. Vizualizirane točke i linije.....	23
Slika 4.6. Trodimenzionalna mreža .....	23
Slika 4.7. Ne-ortogonalnost ćelija.....	24
Slika 4.8. Površina simulacije .....	25
Slika 4.9. Mreža područja Drenove .....	26
Slika 4.10. Trodimenzionalni prikaz terena.....	27
Slika 4.11. Površina simulacije .....	27
Slika 4.12. Mreža područja Vareš.....	28
Slika 4.13. Površina simulacije .....	29
Slika 4.14. Mreža područja Belluno .....	29
Slika 4.15. Tok pripreme i izrade numeričke mreže u GMSH-u.....	30
Slika 5.1. Reljef terena Drenova .....	34
Slika 5.2. Prikaz vegetacije naselja Drenova .....	35

Slika 5.3. Napredak požara u 20 min.....	35
Slika 5.4. Napredak požara u 1h i 15 min.....	36
Slika 5.5. Napredak požara u 2h i 15 min.....	36
Slika 5.6. Razdvajanje fronte požara nakon 15 minuta.....	37
Slika 5.7. Reljef terena u blizini grada Vareš .....	38
Slika 5.8. Prikaz vegetacije u blizini grada Vareš.....	38
Slika 5.9. Napredak požara u 15 min.....	39
Slika 5.10. Napredak požara u 30 min.....	39
Slika 5.11. Napredak požara u 1h i 25 min.....	40
Slika 5.12. Napredak požara u 1h i 55 min.....	40
Slika 5.13. Utjecaj vjetra na širenje požara.....	41
Slika 5.14. Reljef terena u blizini grada Belluno .....	42
Slika 5.15. Prikaz vegetacije terena Belluno .....	42
Slika 5.16. Napredak požara u 12 min.....	43
Slika 5.17. Napredak požara u 40 min.....	43
Slika 5.18. Napredak požara u 1h i 10 min.....	44
Slika 5.19. Napredak požara u 1h i 45 min.....	44
Slika 5.20. Zaustavljanje požara na vrhu brijega.....	45

## POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Korišteni algoritmi .....	25
Tablica 4.2. Gustoća mreže Drenova .....	26
Tablica 4.3. Gustoća mreže Vareš.....	28
Tablica 4.4. Gustoća mreže Belluno .....	29
Tablica 5.1. Vrijednosti parametara za naselje Drenova.....	32
Tablica 5.2. Vrijednosti parametara u blizini grada Vareš.....	32
Tablica 5.3. Vrijednosti parametara u blizini grada Belluno .....	33

## SAŽETAK

Tema rada bila je priprema i obrada numeričke mreže za računalne simulacije širenja šumskih požara. U uvodnom dijelu opisane su karakteristike šumskih požara i njegovog širenja te su opisani postojeći matematički modeli širenja šumskih požara. Za simulaciju širenja požara korišten je model baziran na očuvanju energije i goriva, dok se izrada simulacije sastojala od izrade numeričke mreže u programu GMSH pomoću Python API-a te zadavanja i izrade simulacije u programu OpenFOAM. Izrađene su tri simulacije širenja požara: kod naselja Drenova u gradu Rijeka, u blizini grada Vareš u Bosni i Hercegovini i na području grada Belluno u Italiji. Na kraju su vizualizirani rezultati simulacija odabranih područja.

**Ključne riječi:** šumski požar, numerička mreža, GMSH, računalna simulacija, OpenFOAM

## **ABSTRACT**

The topic of this paper was the preparation and processing of a numerical mesh for wildfire computer simulations. The introductory section describes the characteristics of forest fires and their spread, as well as the existing mathematical models of wildfires. For the wildfire simulation, a model based on the conservation of energy and fuel was used. The simulation process consisted of creating a numerical mesh in GMSH using the Python API and setting up and running the simulation in OpenFOAM. Three wildfire simulations were created: one near the settlement of Drenova in the city of Rijeka, another near the city of Vareš in Bosnia and Herzegovina, and the third in the area of the city of Belluno in Italy. Finally, the results of the simulations for the selected areas were visualized.

**Keywords:** forest fire, numerical mesh, GMSH, computer simulation, OpenFOAM