

Vizualizacija i animacija računalne simulacije širenja šumskih požara

Juračić, Filip

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:190:934093>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

VIZUALIZACIJA I ANIMACIJA RAČUNALNE SIMULACIJE
ŠIRENJA ŠUMSKIH POŽARA

Rijeka, rujan 2024.

Filip Juračić

0069092373

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**VIZUALIZACIJA I ANIMACIJA RAČUNALNE SIMULACIJE
ŠIRENJA ŠUMSKIH POŽARA**

Mentor: prof. dr. sc. Jerko Škifić

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

Rijeka, rujan 2024.

Filip Juračić

0069092373

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo

Predmet: Računarske metode

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Filip Juračić (0069092373)**

Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)

Zadatak: **Vizualizacija i animacija računalne simulacija širenja šumskih požara /
Visualization and animation of computer simulations of wildfire**

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 jednačbama u programskom paketu OpenFOAM. Pripremiti računalnu proceduru za objedinjavanje, tro-dimenzionalnu vizualizaciju i animaciju koristeći softver Blender. 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:
prof. dr. sc. Jerko Škifić

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

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 izjavljujem da sam ja, Filip Juračić, student prijediplomskog sveučilišnog studija strojarstva, u razdoblju od 20.3.2024. godine do 31.8.2024. godine samostalno izradio završni rad na temu „Vizualizacija i animacija računalne simulacije širenja šumskih požara“ pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Jerka Škifića i komentora izv. prof. dr. sc. Stefana Ivića te koristeći navedenu literaturu.

Rijeka, 27.8.2024.

Filip Juračić

0069092373

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Jerku Škifiću te komentoru izv. prof. dr. sc. Stefanu Iviću na usmjeravanju, savjetovanju i strpljenju prilikom izrade završnog rada.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OSNOVNO O POŽARIMA.....	2
2.1. Fizikalne karakteristike požara.....	3
2.2. Općenito o šumskim požarima.....	6
2.3. Požari u Republici Hrvatskoj.....	7
2.4. Borba protiv požara.....	8
3. SIMULACIJA POŽARA U OPENFOAM-U.....	9
3.1. Matematička analiza modela širenja požara.....	9
3.2. Prikupljanje i pridruživanje podataka.....	12
3.3. Digitalni model elevacije.....	15
3.4. Satelitski prikaz i raspodjela goriva.....	17
4. VIZUALIZACIJA ŠUMSKOG POŽARA U PROGRAMU BLENDER.....	18
4.1. Priprema scene.....	18
4.2. Korišteni 3D modeli.....	22
4.3. Učitavanje OpenFOAM rezultata u Blender.....	23
4.4. Renderiranje scene.....	24
5. REZULTATI.....	25
5.1. Rezultati vizualizacije na području Podhuma.....	25
5.2. Rezultati vizualizacije na području Platka.....	29
6. ZAKLJUČAK.....	33
7. LITERATURA.....	34
8. SAŽETAK.....	36
9. ABSTRACT.....	37

1. UVOD

Cilj ovog rada je napraviti animaciju i vizualizaciju širenja šumskog požara za odabrano područje u Republici Hrvatskoj. Požari su nekontrolirano širenje vatre i predstavljaju opasnost za zelena područja, imovinu, životinje te posebice ljude. Upravo zato je važno dobro predvidjeti njihovo napredovanje. U takvim situacijama od velike su pomoći simulacije. Postoji mnogo programa u kojima se one mogu napraviti, a u ovom slučaju je odabran program OpenFOAM. U njega se učitava digitalni model reljefa (engl. *Digital Elevation Model*) te ostali potrebni podaci. Nakon što su dobivene simulacije, one će se dodatno analizirati te će se još napraviti i vizualizacija u programu Blender.

2. OSNOVNO O POŽARIMA

Požari su pojava nekontrolirane vatre te njezino širenje šumskim područjima. Njihov uzrok može biti prirodni kao što je udar groma, no takvi slučajevi su dosta rijetki. Požari puno češće nastaju kao posljedica ljudskih aktivnosti. Uzroci nastanka se mogu podijeliti na: nesretne slučajeve (eksplozija, promet), namjerno podmetanje (piromanija, političke diverzije, osvećivanje i dr.) te nepažnju i grubi nemar (poljoprivredni radovi, prolaznici, dječje igre, neuređeni deponiji smeća, radovi u šumi itd.).

Požari se mogu klasificirati na nekoliko načina. S pogleda vatrogasnih intervencija dijele se prema:

- fazama razvoja na: početne, razbuktales i fazu zgarišta,
- veličini na: male (manja količina koju je lako ugaziti), srednje (jedna ili više prostorija neke zgrade), velike (cijela zgrada, tvornica) i katastrofalne (više zgrada, naselje, postrojenja na otvorenom, velika šumska područja),
- vrsti gorive tvari na požare klase: A (požari krutih tvari kao što je ugljen, papir itd.), B (požari zapaljivih tekućina, npr. zapaljivo ulje), C (požari zapaljivih plinova) i D (specijalni požari koji se teško gase, na primjer lakih metala i sredstava koja su samozapaljiva) te
- mjestu gdje se razvijaju na unutarnje (prostorije zgrada) i vanjske (poljski ili šumski požari).

U ovom radu razmatrat će se šumski požari, dakle klase A.



Slika 2.1. Šumski požar

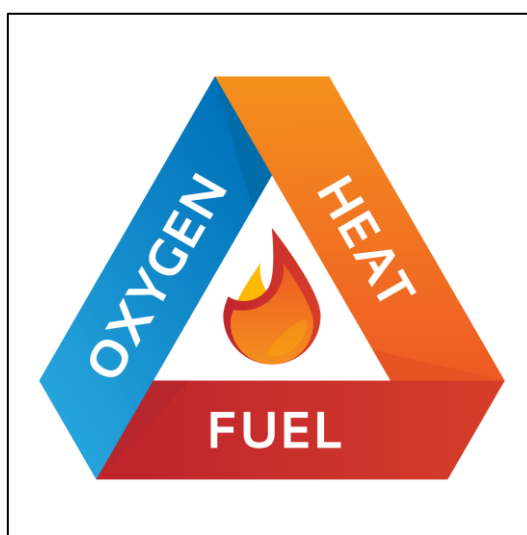
Požare redovito prate razne štete kao što su: uništavanje gospodarskih i stambenih objekata, oštećivanje fizičkih svojstava tla i umanjenje njegove proizvodne sposobnosti, smanjenje humusa, narušavanje estetske vrijednosti okoliša, zagađivanje zraka, ispuštanje raznih štetnih tvari u atmosferu, stradanje ljudi i životinja... Iz ovoga je vidljivo zašto se općenito smatraju lošim ili nepovoljnim, no to nije uvijek istina.

U slučaju kada ih se kontrolira, mogu biti jako korisni. Jedan od takvih primjera je kontrolirano izgaranje vegetacije s ciljem sprječavanja širenja onih većih i opasnijih požara. Time se onemogućava njihovo napredovanje jer kada dospiju do već opožarenog područja, više nema materijala koji bi i dalje mogao podržavati izgaranje.

2.1. Fizikalne karakteristike požara

Za nastanak procesa izgaranja potrebna su tri elementa: goriva tvar (drvo, benzin), dovoljna količina kisika (više od 14% u zraku) i temperatura paljenja koju je potrebno osigurati makar u ograničenom području (iskra). Početna temperatura iznosi od 260°C do 300°C. Za usporedbu, nedovoljno ohlađena šibica ima temperaturu od oko 800°C, a opušak cigarete približno 650°C. Ovime se lako može uočiti kako neoprezno bačene šibice ili opušci mogu uzrokovati požar.

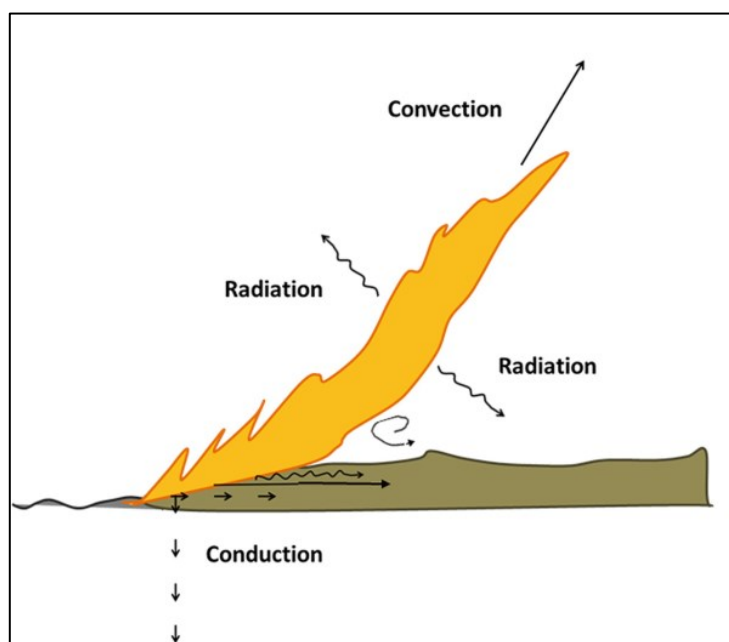
U slučaju izostanka samo jednog od ovih elementa, neće doći do izgaranja. Ovo se može prikazati u obliku trokuta.



Slika 2.2. Trokut izgaranja

Gorenje je egzotermna reakcija što znači da se oslobađa toplina. Ona se dalje prenosi na okolni materijal putem sljedeća tri načina:

- provođenje ili kondukcija – prijenos topline tako da se dio tijela zagrijava izravnim dodirom s izvorom topline, a susjedni se dijelovi redom dalje zagrijavaju,
- strujanje ili konvekcija – prijenos topline u tvarima koje mogu strujati, odnosno u tekućinama i plinovima te
- zračenje ili radijacija – prijenos topline između tijela koja nisu u dodiru, zagrijano tijelo emitira elektromagnetsko zračenje, a hladnije tijelo ga apsorbira i time se zagrijava.

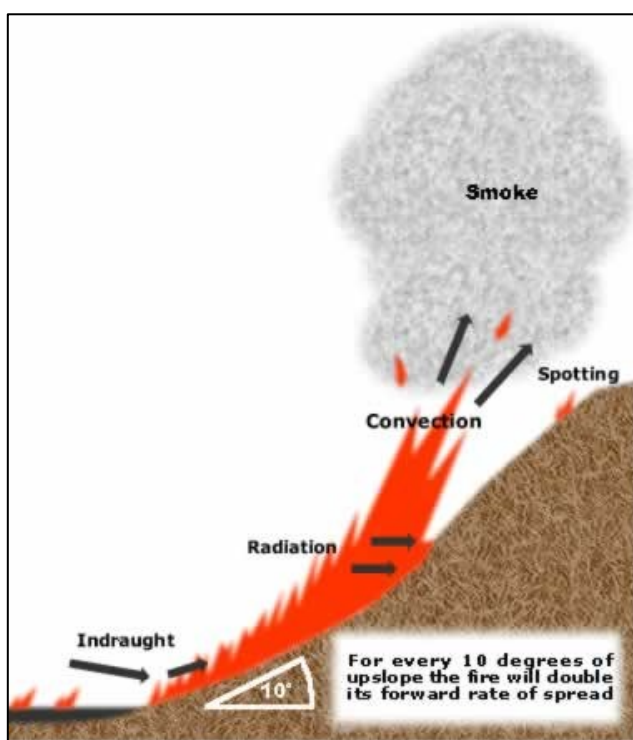


Slika 2.3. Prijenos topline prilikom gorenja

Postoje tri faktora koja najviše utječu na napredovanje požara, a to su: vrijeme, gorivo i topografija. Pod vrijeme misli se na atmosferske uvjete kao što su vlažnost zraka ili prisutnost vjetra. Kada temperatura zraka raste, on može zadržavati veću količinu vlage što znači da relativna vlažnost pada. Ovo rezultira većom vjerojatnošću da dođe do požara, ali samo tijekom dana jer se tijekom noći relativna vlažnost smanjuje, dakle vjerojatnost u tom slučaju pada. Prisutnost vjetra također može pospješivati širenje jer se na taj način dovodi veća količina kisika, suši gorivo te nosi žar koji može započeti požar na nekom drugom mjestu.

Količina goriva kao i njegova horizontalna te vertikalna raspodjela isto bitno utječu na njegovo širenje. Suho granje promjera do $6mm$ te živo granje promjera do $2mm$ pogodno utječe na intenzitet i brzinu širenja [6]. S druge strane grane debljeg promjera gore sporije, ali ne utječu znatno na napredovanje fronte. Količina vlage je važna ne samo za gorivo već i za tlo na kojem se nalazi. Što sadrži više vlage, to je otežano gorenje.

Zadnji čimbenik je topografija terena, to jest njegov oblik. Vatra se brže širi uzbrdo nego nizbrdo. To se događa jer nagib ima sličan utjecaj na napredovanje požara kao i vjetar. Nagib „usmjerava“ vatru prema tlu čime se vegetacija predgrijava, a to pogoduje izgaranju. U slučaju da se nagib poveća za 10 stupnjeva, brzina širenja se udvostručuje. Sukladno tome, ako se nagib nizbrdice poveća, brzina se smanjuje.



Slika 2.4. Širenje vatre na uzbrdici

2.2. Općenito o šumskim požarima

Šumski požari su vanjski požari i mogu zahvatiti izrazito velika područja. Uz već navedenu podjelu, mogu se razvrstati i na sljedeći način:

- niski ili prizemni – zahvaćaju nisko raslinje te mrtvi materijal na tlu, brzo se šire, a mogu doseći temperaturu od 900°C , ovo je najčešći oblik šumskog požara,
- visoki ili vršni – požari krošanja, većinom se razvijaju iz niskog požara jakog intenziteta, mogu se spustiti na zemlju i dalje širiti kao niski požar te se onda ponovno prebaciti u krošnje, od svih oblika ovaj je najopasniji i najteže se suzbija,
- podzemni – redovito se javljaju na tresetištima, sporo se šire, čine male štete i lako se gase, no uništavaju korijenje biljaka te
- požari pojedinih stabala – nastaju udarom munje, paljenjem vatre uz stablo ili u njegovim šupljinama, česti su u prašumama.

Kao što je već rečeno, šumski požari spadaju pod klasu A što znači da gore krute tvari. U šumi gorivo može biti: pokrov tla, živa i suha stabla, grmlje, mahovina, biljke travnatog karaktera, mahovina...

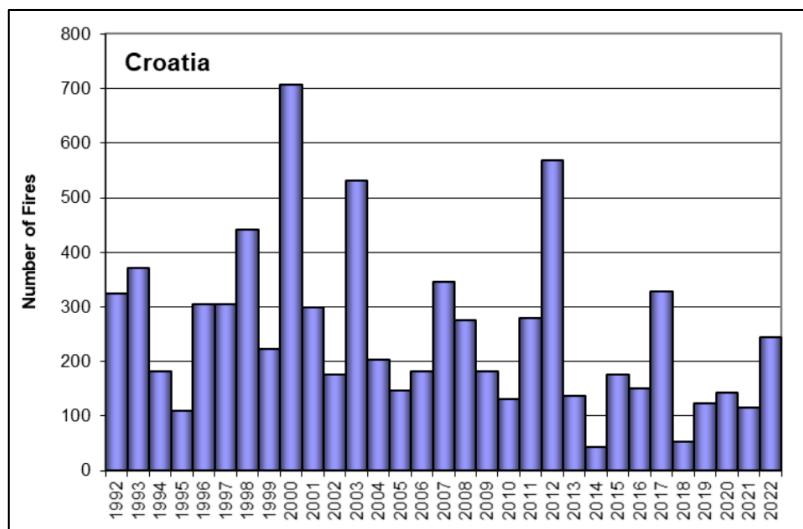


Slika 2.5. Opožareno područje šume

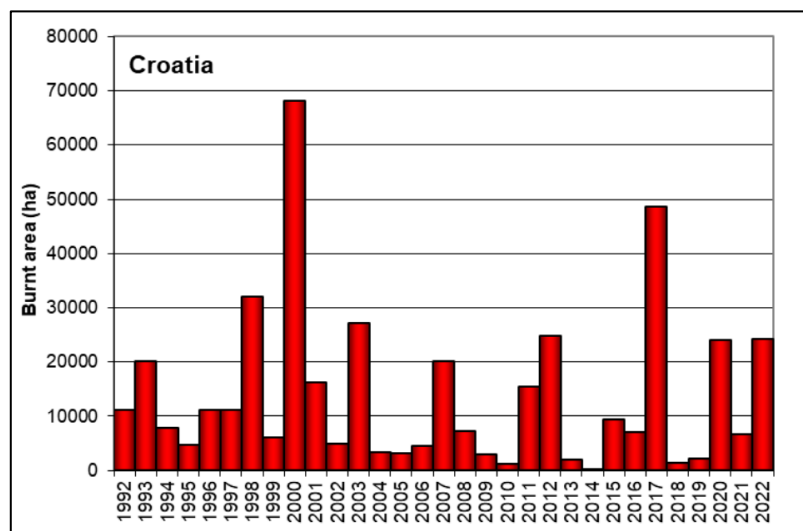
Područja na svijetu koja su najugroženija šumskim požarima su: Sredozemlje, afričke savane i sjevernoameričke borove šume.

2.3. Požari u Republici Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj požari nažalost nisu rijetkost. U razdoblju od 1992. do 2006. prosječno je bilo 300 šumskih požara godišnje, a ukupna prosječno opožarena površina godišnje iznosila je 15446ha. U nastavku su dani podaci za razdoblje od 1992. do 2022. godine.



Slika 2.6. Broj požara u Republici Hrvatskoj od 1992. do 2022. godine [7]



Slika 2.7. Opožarena površina u hektarima u Republici Hrvatskoj od 1992. do 2022. godine [7]

Većina požara se pojavljuje tijekom ljeta u priobalju. Razlog tomu je suha mediteranska klima koju obilježavaju vruća i suha ljeta. Upravo su ovo uvjeti koji pogoduju nastanku i širenju požara.

2.4. Borba protiv požara

U borbi protiv šumskih požara od velike su važnosti: preventivno djelovanje, pravovremeno otkrivanje, dojava i intervencija. Pod preventivno djelovanje spada: zabrana loženja vatre u šumama, plan zaštite, obuka, motriteljsko-dojavna služba, nabava i razmještaj opreme, vatrogasne ophodnje, uklanjanje suhih stabala i drvenih otpadaka, sadnja vrste drveća koja je teže zapaljiva kao što je bukva ili grab... U svakom slučaju preventivno djelovanje bi se trebalo smatrati najvažnijim jer se na taj način u potpunosti može izbjeći požar.

Još jedan važan element u protupožarnoj borbi je predviđanje širenja požara. Ovo može biti vrlo teško jer ovisi o puno čimbenika. Jedan od načina kojim se ovo može postići je postavljanje malog kontroliranog požara na nekom mjestu te mjerenje njegovog napredovanja. Time se dobivaju empirijski podaci, no njih bi vjerojatno bilo vrlo teško primijeniti na neko veće područje.

U predviđanju napredovanja požara koriste se i simulacije. One mogu prikazati njegovo širenje na nekom proizvoljnom području uzimajući u obzir i vanjske utjecaje kao što je vjetar. Osim toga omogućavaju i promjenu početnih parametara poput terena. To može biti od izuzetno velike važnosti jer bi se u slučaju da negdje izbije požar mogli uzeti podaci područja i ubaciti ih u simulaciju. Ovo ne bi bilo jednostavno ostvariti sa stvarnim modelom, dakle ovo je jedna od prednosti simulacija. Negativna strana ovoga je što bi se trebali čuvati podaci o terenu kao što je vegetacija, nagib ili količina goriva, no rezultati bi se mogli dobiti relativno brzo. U slučaju da se koristi simulacija bitno je i dobro postaviti početne uvjete te razumjeti rješenje.

3. SIMULACIJA POŽARA U OPENFOAM-U

U ovom radu napraviti će se dvije simulacije od kojih će jedna biti na području Poduhma, a druga na području Platka. Odabrani program koji je korišten za njihovu izradu je OpenFOAM, besplatni softver otvorenog pristupa. Redovito se koristi u industriji i znanosti, a može rješavati probleme iz područja: kompleksnih protoka fluida koji uključuju kemijske reakcije, turbulencije, prijenosa topline, elektromagnetizma, akustike itd. Za razliku od većine sličnih programa, nema grafičko korisničko sučelje, već se podaci upisuju u datoteke na unaprijed određeni način koji je razumljiv softveru.

3.1. Matematička analiza modela širenja požara

Matematički model korišten u ovom radu je modificirani oblik modela iz rada [10]. Temeljen je na zakonu o očuvanju energije, ravnoteži količine goriva i brzini izgaranja goriva. Sastoji se od dvije parcijalne diferencijalne jednačbe vezane za ponašanje topline i goriva u dvije dimenzije. Ove jednačbe su još poznate pod nazivom reakcijsko-konveksijsko-difuzijske jednačbe, a temelje se na Arrheniusovom zakonu koji opisuje brzinu kemijske reakcije u ovisnosti o temperaturi procesa. Prva jednačba glasi:

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

gdje je:

$T[K]$ – termodinamička temperatura vatre,

$k \left[\frac{m^2}{s} \right]$ – koeficijent toplinske difuzije,

$k_w [m/s]$ – koeficijent advekcije vjetra,

$\vec{v} \left[\frac{m}{s} \right]$ – brzina vjetra,

$k_s \left[\frac{m}{s} \right]$ – koeficijent advekcije terena,

$Z[m]$ – nadmorska visina,

$A \left[\frac{K}{s} \right]$ – porast temperature po sekundi pri maksimalnoj brzini izgaranja te potpunim dostupnim gorivom bez hlađenja,

$S [m^3]$ – količina neiskorištenog goriva u odnosu na ukupno gorivo,

$B[K]$ – koeficijent proporcionalnosti u modificiranom Arrheniusovom zakonu,

$T_a[K]$ – temperatura okoline i

$C \left[\frac{1}{K} \right]$ – skalirani koeficijent prijelaza topline na okolinu.

Član $\nabla \cdot (k\nabla T)$ opisuje prijenos topline radijacijom na kratke udaljenosti, a član $k_w \cdot \vec{v} \cdot \nabla T$ kako vjetar utječe na širenje topline. Članom $k_s \cdot \nabla Z \cdot \nabla T$ se definira kako nagib terena utječe na prijenos topline, a članom $S \cdot e^{\frac{-B}{T-T_a}}$ koliko brzo se gorivo troši izgaranjem. Posljednji član $A \cdot C \cdot (T - T_a)$ opisuje konvektivnu toplinu koja odlazi u atmosferu.

Drugom jednačbom se opisuje brzina izgaranja i ona glasi:

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

gdje je $C_s \left[\frac{1}{s} \right]$ relativna brzina izgaranja goriva.

Izraz $e^{\frac{-B}{T-T_a}}$ je modificirani oblik brzine izgaranja koja kod Arrheniusovog zakona glasi $e^{\frac{-B}{T}}$. Kod takvog oblika brzina izgaranja poprima neku vrijednost čak i ako je temperatura malo veća od apsolutne nule. Zbog tog razloga uzima se u obzir temperatura okoline, dakle izraz će poprimiti neku vrijednost samo kada je temperatura veća od temperature okoline. Ovo se može zapisati na sljedeći način:

$$r(T) = \begin{cases} e^{\frac{-B}{T-T_a}}, T > T_a \\ 0, T \leq T_a \end{cases} \quad (3.3)$$

Ovo je jedan od jednostavnijih modela što se tiče gorenja, a daje rješenja u obliku „putujućih valova“ izgaranja, tj. požar će se širiti otprilike koncentrično od mjesta nastanka, koji se sastoji od: predzagrijanog područja ispred vatre, zone izgaranja i područja iza izgaranja kojim je prošla fronta plamena.

Sada treba odrediti koeficijente A, B, C . Kako bi se to napravilo, prvo je potrebno promatrati hipotetski slučaj u kojem je temperatura konstantna. Time će samo zadnji član u jednačbi 3.1 utjecati na rješenje. Količina neiskorištenog goriva će se smatrati konstantnom ($S \approx 1$), a brzina izgaranja će se zanemariti ($C_s \approx 0$) tako da u konačnici slijedi:

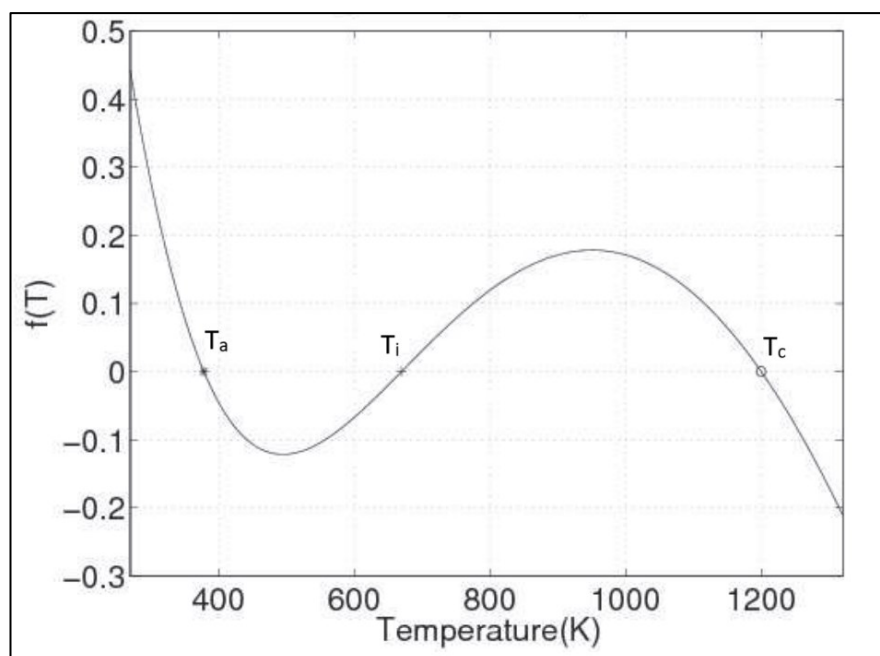
$$\frac{dT}{dt} = A \cdot (e^{\frac{-B}{T-T_a}} - C \cdot (T - T_a)) \quad (3.4)$$

Konstantne vrijednosti temperatura koje su rješenja ove jednačbe zovu se točke ekvilibrija jer je pri tim vrijednostima toplina proizvedena gorenjem jednaka toplini koja se odvodi u okoliš.

Slijedi:

$$f(T) = e^{\frac{-B}{T-T_a}} - C \cdot (T - T_a) = 0 \quad (3.5)$$

Ova jednačba ima tri rješenja. Prvo rješenje (T_p) je donji temperaturni režim i predstavlja stabilnu ravnotežnu temperaturu. Ukoliko je temperatura manja od ove vrijednosti, onda dominira toplina nastala izgaranjem te dolazi do povećanja temperature, a u slučaju da je ona veća, onda dominira konvektivno hlađenje te temperatura pada. Ako vrijedi $T_0 < T_a$, gdje je T_0 temperatura pri kojoj nema reakcije, a T_a temperatura okoline, onda je ova vrijednost samo malo veća od temperature okoline, odnosno može se pisati $T_p = T_a$. Drugo rješenje (T_i) je točka nestabilne ravnoteže. Ako je temperatura manja od T_i , onda prevladava konvektivno hlađenje te temperatura pada, a ako je veća, onda prevladava toplina izgaranja i temperatura raste. Ova točka se još zove i temperatura samozapaljenja, odnosno to je temperatura pri kojoj je reakcija gorenja samoodrživa. Posljednje rješenje (T_c) predstavlja stabilnu ravnotežu pri visokim temperaturama, odnosno to je maksimalna stabilna temperatura izgaranja i uzima u obzir opskrbu gorivom i kisikom. Funkcija 3.5 je zajedno s navedenim točkama prikazana na slici 3.1.



Slika 3.1. Funkcija 3.5 i njene nultočke [10]

Kada su poznate ove nultočke te uzimajući u obzir da vrijedi $T_0 \leq T_a < T_i < T_c$, moguće je odrediti koeficijente B i C :

$$B = \frac{\ln\left(\frac{T_i - T_a}{T_c - T_a}\right)}{\frac{1}{T_c - T_0} - \frac{1}{T_i - T_0}} \quad (3.6)$$

$$C = \frac{e^{\frac{-B}{T_i - T_0}}}{T_i - T_a} \quad (3.7)$$

Još je potrebno izračunati koeficijent A . To se može napraviti pomoću karakterističnog vremena hlađenja. Nakon što prođe „val izgaranja“ te većina ili svo gorivo izgori, a temperatura padne i vrijednost proizvedene topline se spusti na zanemarivo malu vrijednost, temperatura se može izračunati koristeći sljedeću formulu:

$$\frac{dT}{dt} = -A \cdot C \cdot (T - T_a) \quad (3.8)$$

Iz ovoga slijedi:

$$T(t) = T_a + (T(t_0) - T_a) \cdot e^{-A \cdot C \cdot (t - t_0)} \quad (3.9)$$

Ovime se može definirati karakteristično vrijeme hlađenja t_c tako da ono bude jednako vremenu koje je potrebno da se tlo ohladi za faktor e^{-1} , to jest:

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

Konačno, slijedi da je koeficijent A jednak:

$$A = \frac{1}{C \cdot t_c} \quad (3.11)$$

3.2. Prikupljanje i pridruživanje podataka

Kao što je rečeno, napraviti će se dvije simulacije, ali kako je njihov proces izrade gotovo isti, u nastavku će biti opisan postupak samo za područje Podhuma prikazano na sljedećoj slici.



Slika 3.2. Područje Podhuma na kojem je rađena simulacija

Može se vidjeti da na slici 3.2 ima više različitih vrsta terena kao što je: cesta, travnato područje, kuće, grmoliko područje pa čak i nekoliko dijelova na kojima se nalaze stabala. Područje, odnosno teren, na kojem se požar nalazi izrazito utječe na njegovo širenje. Na primjer, puno će se teže širiti na nekom kamenitom području nego na šumskom. Sva ova svojstva su definirana utjecajnim faktorima. Neki od tih faktora su konstantni što znači da će biti isti na bilo kojoj vrsti terena. Konstantni utjecajni faktori su navedeni u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Konstantni utjecajni faktori

Oznaka i vrijednost	Opis
$B = 570K$	koeficijent proporcionalnosti u modificiranom Arrheniusovom zakonu
$C = 0,00002 \frac{1}{K}$	skalirani koeficijent prijelaza topline na okolinu
$k_s = 0,1 \frac{m^2}{s}$	koeficijent advekcije terena
$S = 1$	količina neiskorištenog goriva u odnosu na ukupno gorivo

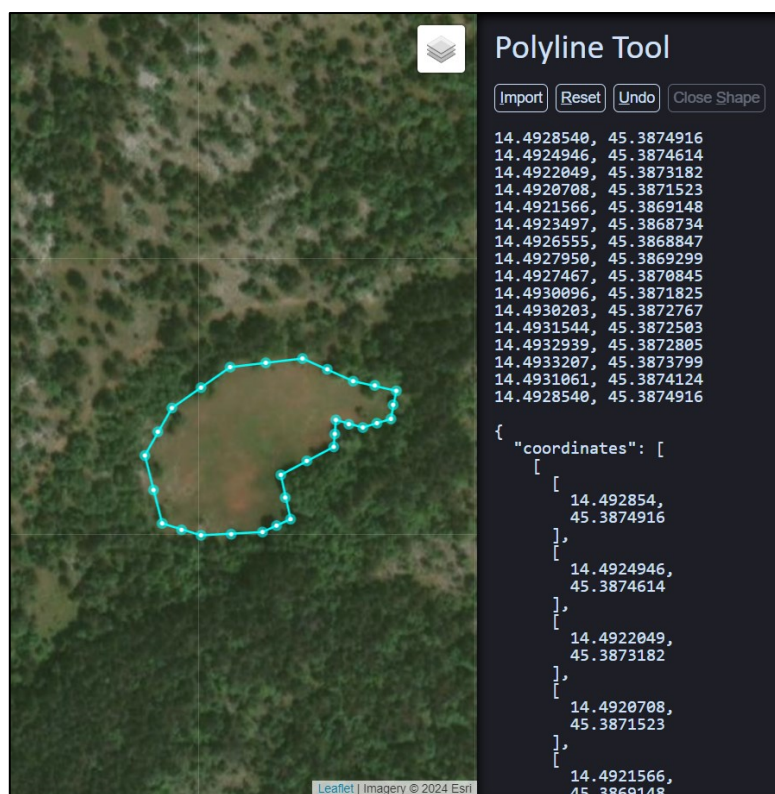
Neki od ovih faktora nisu konstantni, već ovise o terenu. Oni su navedeni u sljedećoj tablici.

Tablica 3.2. Utjecajni faktori ovisni o terenu

Oznaka i mjerna jedinica	Naselje	Cesta	Grmoliko područje	Šumsko područje	Kamenjar	Travnato područje
$A \left[\frac{K}{s} \right]$	0	0	170	200	100	150
$C_s \left[\frac{1}{s} \right]$	0	0	0,1625	0,13	0,2	0,1625
$k \left[\frac{m^2}{s} \right]$	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05
$k_w \left[\frac{m}{s} \right]$	0,1	0,1	0,1	0,025	0,1	0,1

Jedini faktori koji još nedostaju su temperatura T te nadmorska visina Z . Kako su šanse da dođe do požara veće u ljetno vrijeme, pretpostavljena je temperatura od $30^\circ C$ na cijelom području. U sljedećem poglavlju bit će objašnjeno kako se određivala nadmorska visina točaka, ali prije toga pokazat će se kako su se ove vrijednosti pridruživale terenu.

Prvo je trebalo definirati vrste područja na kojem se radila simulacija. To se radilo preko stranice [11] koja omogućava stvaranje poligona na mapi.



Slika 3.3. Mapiranje područja, Podhum [11]

Na ovaj način definirane su ceste, kuće, grmoliko, travnato, šumsko područje... Vrijednosti ovih koordinata spremljene su u liste koje su se onda koristile za izradu poligona u programskom jeziku Python. Ovo se radilo pomoću knjižnice „shapely“ koja sadrži funkciju kojom se može napraviti poligon. U nastavku je prikazan kod kojim se radio poligon prikazan na slici 3.3 u Python-u. „Grass_points_1“ je lista koja sadrži koordinate prikazane na toj slici.

```
Polygon_grass_1 = shapely.Polygon(Grass_points_1)
```

Slika 3.4. Stvaranje poligona koji predstavlja travu

Navedena knjižnica između ostalog sadrži i funkciju koja provjerava ako se točka nalazi unutar poligona na način da vraća vrijednost „True“ ako je to istina, odnosno „False“ ako nije. Na taj način se lako može odrediti kojem području pripada koja točka.

```
Point = shapely.Point(geografska_duzina, geografska_sirina)
Point.within(Name_of_polygon)
```

Slika 3.5. Provjera ako točka pripada poligonu

3.3. Digitalni model elevacije

Digitalni model elevacije (engl. *Digital Elevation Model*) je prikaz topografske površine Zemlje ne uključujući stabala, zgrade i ostale površinske objekte. Obuhvaća područje između dva uzastopna stupnja geografske visine te geografske širine. U ovom slučaju to su $14^{\circ}E$ i $15^{\circ}E$ te $45^{\circ}N$ i $46^{\circ}N$. Podaci su zapisani u obliku slike rezolucije $12001 \cdot 12001$ piksela na način da je svakom pikselu pridružena pripadajuća elevacija.



Slika 3.6. DEM datoteka na području Kvarnera

Slika kao takva nije jako korisna, no moguće je učitati podatke koje ona sadrži u matricu u Python-u. Kako bi to bilo moguće potrebna je knjižnica „os“ pomoću koje se određuje put do slike te knjižnica „PIL“ koja omogućuje manipulaciju slikama. Kod kojim se ovo radi prikazan je u nastavku.

```
image_path = os.path.abspath("Relativni_put_do_slike")
Z_coor = PIL.Image.open(image_path)
Z_coor = np.array(Z_coor)
```

Slika 3.7. Pridruživanje vrijednosti iz digitalnog modela elevacije matrici

Kako su dimenzije slike te stupnjevi koji omeđuju područje poznati, moguće je dobiti koordinate svih točaka na način da se napravi lista od 12001 elemenata čiji je prvi, odnosno zadnji član jednak graničnom stupnju. Za ovo je potrebna još jedna knjižnica koja se zove „Numpy“, a uvezena je u Python pod nazivom „np“. Funkcija prikazana na sljedećoj slici stvara listu od 12001 elementa čija je prva vrijednost jednaka prvom broju u zagradi, a zadnja vrijednost drugom broju u zagradi.

```
N_WM = np.linspace(46, 45, 12001)
E_WM = np.linspace(14, 15, 12001)
```

Slika 3.8. Određivanje koordinata točaka

Ovime su napravljene liste koje sadrže koordinate cijelog područja prikazanog na slici 3.6. Simulacija se neće raditi na tako velikom području tako da su iz slike uzete samo one koordinate koje su potrebne. Ovo se radilo uspoređivanjem koordinata u već navedenim listama s onim na Google kartama. Koordinate područja su u slučaju Podhuma tvorile mrežu od 110 redova te 155 stupaca, no time mreža nije imala jednak broj redaka i stupaca. Radi toga razloga, a i radi veće preciznosti, bilo ju je potrebno ugustiti. To se napravilo na sljedeći način:

```
f = RegularGridInterpolator((N_degree, E_degree), Z_coordinates, method =
"linear")
Area_Z_coordinates = f((N_matrix, E_matrix))
```

Slika 3.9. Ugušćivanje mreže

gdje je:

N_degree – lista stupnjeva u smjeru sjever-jug,

E_degree – lista stupnjeva u smjeru istok-zapad,

Z_coordinates – matrica koja sadrži vrijednosti elevacije,

method = „*linear*“ – atribut u funkciji koji označava da će se izvršiti linearna interpolacija,

N_matrix – matrica koja sadrži stupnjeve ugušćenog područja u smjeru sjever-jug i

E_matrix – matrica koja sadrži stupnjeve ugušćenog područja u smjeru istok-zapad.

Kao što se može vidjeti, funkcijom *RegularGridInterpolator*, preuzetaj iz knjižnice „*scipy.interpolate*“, se definira linearna interpolacija čiji se rezultati onda pridružuju matrici *Area_Z_coordinates*.

Sada su određene sve vrijednosti potrebne za provođenje simulacije. Nakon ovoga slijedilo je zapisivanje podataka u datoteke na način koji je razumljiv rješavaču.

3.4. Satelitski prikaz i raspodjela goriva

U nastavku se nalaze satelitski prikazi područja Podhuma i Platka na kojima su rađene simulacije te prikaz terena s obzirom na gorivo.



Slika 3.10. Satelitska snimka područja simulacije, Podhum (lijevo) i Platak (desno)



Slika 3.11. Prikaz terena s obzirom na gorivo, Podhum (lijevo) i Platak (desno)

Bijelom bojom prikazane su ceste i kuće, a sivom bojom područje kamenjara. Svijetlozelenom bojom označena su travnata područja, umjereno zelenom grmolika, a tamnozelenom područja šume. U sljedećem poglavlju bit će opisan postupak vizualizacije rezultata simulacija.

4. VIZUALIZACIJA ŠUMSKOG POŽARA U PROGRAMU BLENDER

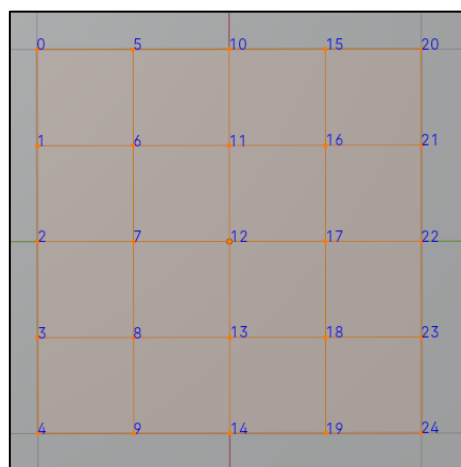
Blender je softver koji služi za 3D izradu te se koristi za: stvaranje filmova, animacija, igara, a upotrebljavaju ga i znanstvenici u svojim istraživanjima. Podržava: modeliranje, animacije, simulacije, renderiranje i drugo, a mogućnosti onoga što se u njemu može napraviti su gotovo neograničene.

Besplatan je i objavljen pod općom javnom licencom što znači da svatko ima pravo koristiti ga, dijeliti pa čak i mijenjati, no u tom slučaju potrebno je navesti promjene koje su učinjene (engl. *copyleft*). Napredniji korisnici u tu svrhu koriste Blender-ovo aplikacijsko programsko sučelje (engl. *application programming interface*) u Python-u. Ono se može upotrijebiti i kako bi se napravili specijalizirani alati te automatizirali neki procesi. Automatizacija procesa je jedan od glavnih razloga zašto je ono korišteno u ovom radu.

4.1. Priprema scene

Kako bi se pripremila scena, prvo je bilo potrebno učitati područje za što su postojale dvije opcije. Prva je bila korištenje dodatka u Blender-u koji omogućava učitavanje OpenFOAM rezultata, no ona je imala svoje poteškoće. Kao prvo, OpenFOAM ne može raditi simulacije u 2D-u, nego samo u 3D-u što znači da se neće učitavati površina nego volumen. Prema tome broj točaka će biti duplo veći, a to rezultira sporijim radom programa što je svakako nepoželjno. Kao drugo, pošto se učitava volumen, bilo bi teško pristupiti točkama mreže. Njih Blender označava nepredvidljivo pa bi bilo skoro nemoguće pronaći logiku koja ih prati na precizan način.

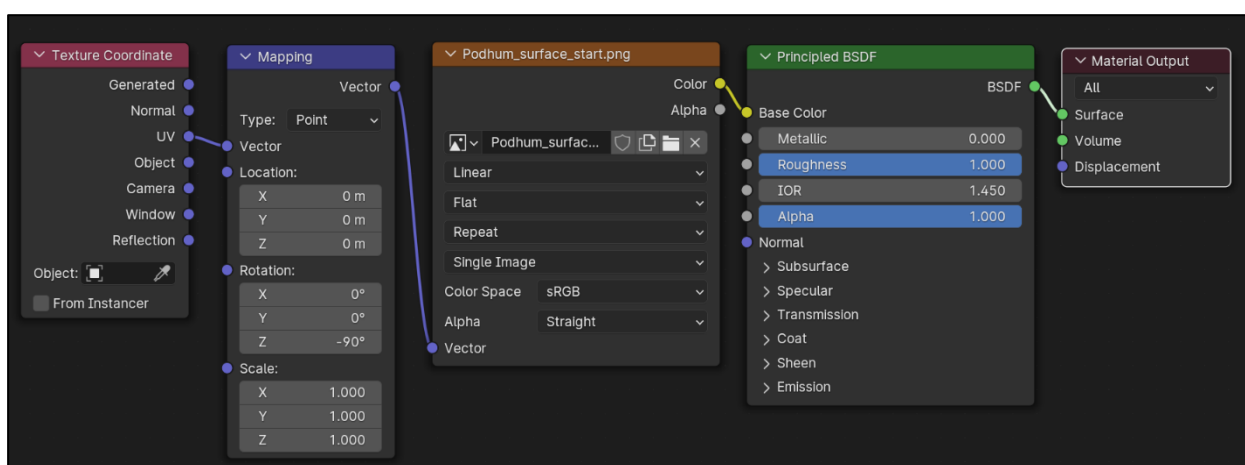
Druga opcija bila je stvaranje mreže koja se u Blender-u zove „*grid*“. Ona ima označene točke po stupcima pa je stoga prikladna za pristupanje točkama. Ovo je metoda koja je korištena.



Slika 4.1. Oznake točaka na mreži (*grid* u Blender-u)

Kada je napravljena mreža odgovarajuće veličine i broja točaka, bilo ju je potrebno modelirati da predstavlja oblik područja. Iz ovog razloga je napravljen jedan CSV (engl. *comma separated values*) dokument koji sadrži nadmorske visine točaka iz matrice *Area* definirane u prošlom poglavlju. Nakon toga napravljena je petlja koja prolazi kroz tu datoteku te pridružuje točkama mreže odgovarajuće visine na način da ih pomakne u smjeru osi z za očitane vrijednosti.

Kako bi mreže predstavljale područje simulacije, još im je bilo potrebno pridružiti odgovarajuće grafike. Za to su korišteni satelitski prikazi sa slike 3.10. Grafika se u ovom slučaju pridruživala kao materijal koji je bio definiran preko stabla čvorova (engl. *node tree*), odnosno preko skupa interaktivnih prozora koji se međusobno mogu povezati te utjecati na konačan izgled objekta.



Slika 4.2. Materijal prikazan u obliku čvorova za dodavanje grafike mreži (u ovom slučaju za Podhum)

Kao što se može vidjeti, korišteno je pet čvorova koji rade sljedeće:

- „*Texture Coordinate*“ – pruža informacije o položaju mreže u prostoru,
- „*Mapping*“ – služi za manipulaciju slike koja se pridružuje, na primjer rotacija slike,
- „*Image Texture*“ – u ovom slučaju se zove „*Podhum_surface_start.png*“, njime se može dodavati slika kao površina objekta,
- „*Principled BSDF*“ – služi za mijenjanje hrapavosti, boje, refleksije materijala itd. i
- „*Material Output*“ – preslikava postavljene postavke na volumen, odnosno u ovom slučaju na površinu.

Osim toga dodane su i izohipse (linije koje spajaju točke iste nadmorske visine) kako bi se jasnije mogao prepoznati reljef. U tu svrhu stvorena je jedna ravna ploha i kopija mreže te su upotrijebljeni modifikatori (engl. *modifiers*). To su automatske operacije koje utječu na geometriju objekata na način da je uređuju ili deformiraju. Dijelev se na četiri skupine:

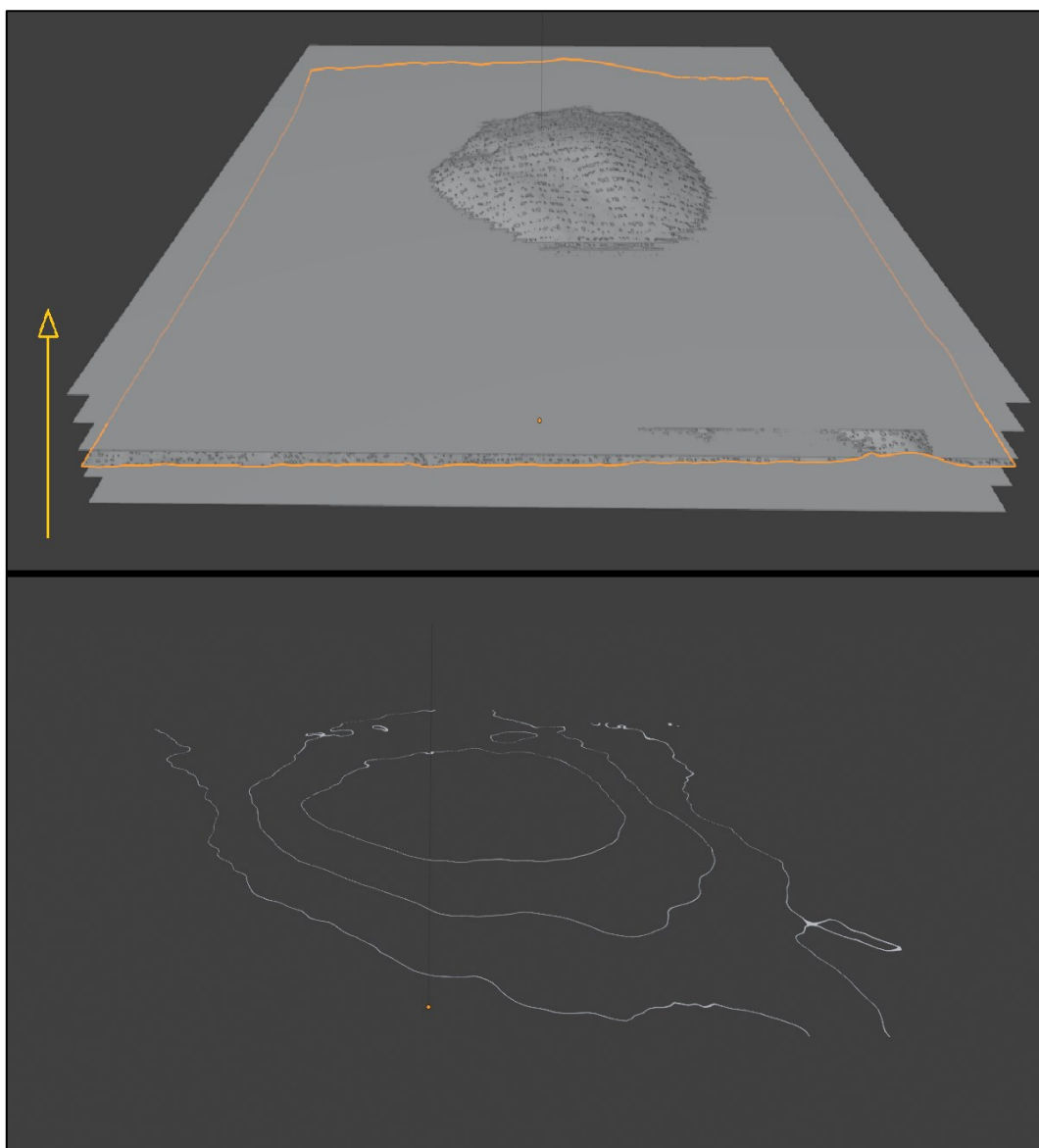
- 1) „*Edit*“ – ne utječu izravno na geometriju objekata, već mijenjaju neke druge podatke vezane uz njih kao što su skupine točaka,
- 2) „*Generate*“ – mogu biti konstruktivne ili destruktivne prirode, utječu na cijelu topologiju mreže, to jest na raspodjelu vrhova, bridova i ploha koje određuju njen oblik, pomoću njih se može dodavati nova geometrija, ali i mijenjati prikaz mreže,
- 3) „*Deform*“ – mijenjaju oblik objekata, ali ne i njihovu topologiju i
- 4) „*Simulate*“ – koriste se za prikaz simulacija iz područja fizike.

U ovom radu ukupno ih je korišteno troje, a objašnjeni su u sljedećoj tablici. Svi od navedenih pripadaju skupini „*Generate*“.

Tablica 4.1. Korišteni modifikatori i njihov opis

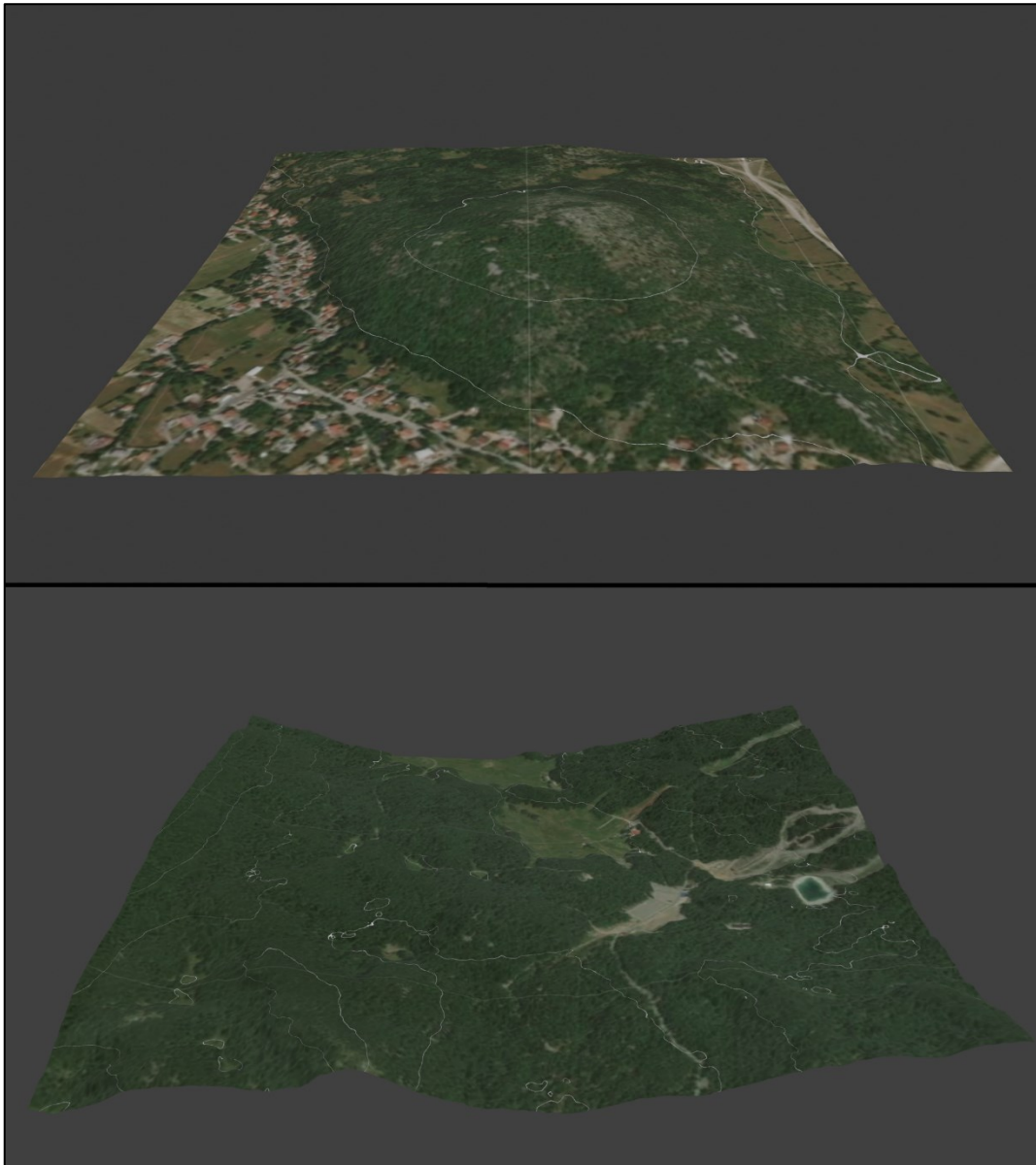
Naziv	Opis	Objekt kojem je pridružen
<i>Array</i>	Stvara niz, odnosno proizvoljan broj kopija objekata koje se onda mogu rasporediti po određenoj osi za definirani razmak	Ravna ploha
<i>Solidify</i>	Pridružuje određenu debljinu ploham, bez njega se nisu pokazivale sve izohipse te je korišten kako bi se dobio zadovoljavajući prikaz	Ravna ploha i mreža
<i>Boolean</i>	Omogućava stvaranje unije, razlike ili presjeka dva ili više objekata, u ovom slučaju je korišteno presijecanje objekata	Mreža

Vizualizacija gornjeg postupka je prikazana na sljedećoj slici. Žutom strelicom označen je smjer dodavanja kopija ploha, a narančastim obrubom kopirana mreža područja (u ovom slučaju područja Podhuma). Nakon što su im pridruženi odgovarajući modifikatori, dobiju se izohipse koje se mogu vidjeti na donjoj slici. One su razmaknute za 25m na Podhumu i za 50m nadmorske visine na Platku.



Slika 4.3. Presjek terena plohama i dobivene izohipse (Podhum)

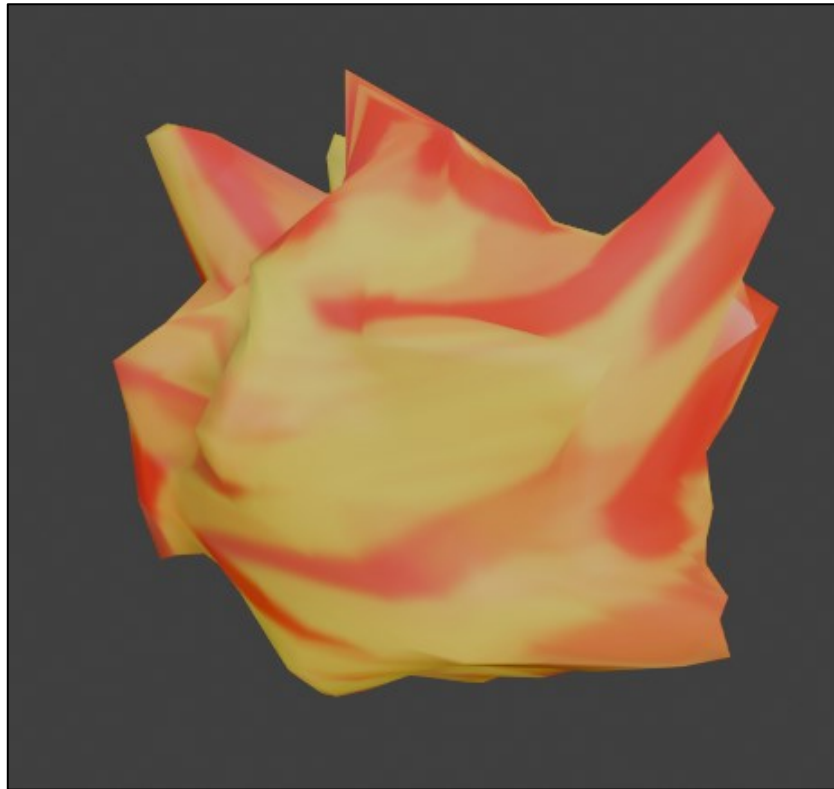
Na kraju su još dodani svijetlo i kamera te je time scena bila potpuna. Konačan izgled početnih površina može se vidjeti na sljedećoj stranici.



Slika 4.4. Početni prikazi terena, Podhum (gore) i Platak (dole)

4.2. Korišteni 3D modeli

Početna ideja bila je da se koriste modeli stabala i grmlja koji će pocrniti nakon što vatra prijeđe preko njih. Bilo je jako zahtjevno za program učitati tako velik broj podataka tako da je ova ideja naposljetku napuštena, no nije bilo toliko problematično učitavati modele vatre pa su oni i dalje korišteni. Nisu napravljeni vrlo detaljno jer se svi ti detalji ne bi vidjeli te bi samo usporavali Blender. U nastavku je prikazan jedan od modela vatre.



Slika 4.3. Jedan od četiri korištenih modela vatre

4.3. Učitavanje OpenFOAM rezultata u Blender

OpenFOAM daje rezultate u obliku običnih datoteka spremljenih u mape čiji je naziv jednak vremenskom trenutku za koji su podaci zapisani. Jedan od podataka koji se zapisivao bila je temperatura. Kod koji je napravljen kako bi se točkama pridruživale odgovarajuće temperature je jako sličan onome koji je točkama pridruživao vrijednosti nadmorske visine, samo što se u ovom slučaju nisu koristile CSV, već obične .txt datoteke. U tim su datotekama temperature zapisane svaka u svojem redu.

Program je iz svake mape čitao vrijednosti temperature i zatim ih pridruživao točkama. Ako je temperatura bila veća od određene vrijednosti, slika terena se na tome mjestu bojala u narančasto-žutu boju, a točki je pridružen jedan od modela vatre. Pridruživanje modela se radilo s određenom vjerojatnošću jer se nije mogla vidjeti velika razlika kada je svaka točka imala svoj model i kada je oko 80 posto točaka imalo svoj model. Ovo se napravilo kako bi program bio brži.

Kada se temperatura još smanjila, onda se površina bojala u crvenkastu boju kako bi predstavljala žar koji ostane nakon što se vatra ugasi. Naravno, tim točkama nije dodavan Blender model vatre. Konačno, kada se temperatura još više smanjila, površina se bojala u sivu boju i time je predstavljala izgoreno područje. Nakon što se učitalo i promijenilo sve što je bilo potrebno, napravila se slika scene koja se onda spremala u mapu. Ovaj postupak se ponavljao za svaki vremenski trenutak, a dobivene slike su onda spojene u video.

4.4. Renderiranje scene

Renderiranje scene je postupak kojim se scena u 3D-u pretvara u 2D sliku. Za renderiranje u Blender-u može se koristiti: *Cycles*, *Workbench* ili *Eevee*. *Cycles* je alat koji koristi tragač puta (engl. *path tracer*). Tragač puta je tehnika renderiranja koja koristi praćenje zraka (engl. *ray tracing*) s ciljem stvaranja što realnijih slika. Negativna strana ovoga je što zahtijeva više vremena. *Workbench* se koristi tijekom modeliranja i za pretpregled animacija te nije napravljen za dobivanje konačnih slika. *Eevee* je alat za renderiranje u stvarnom vremenu. Temelji se na rasterizaciji što znači da se geometrija projicira na 2D plohu. Ovo se odvija na način da se prvo odrede koje su sve površine vidljive kameri i onda se na temelju brojnih algoritama pretpostavlja kako svjetlost međudjeluje s površinama i materijalima. Zbog ovoga *Eevee* nije precizan kao i *Cycles*, ali je zato brži. Ovo je jedan od razloga zašto je u ovom radu korišten upravo *Eevee*.

5. REZULTATI

U nastavku će biti predstavljeni dobiveni rezultati. Obje simulacije su rađene bez utjecaja vjetra te je vremenski razmak između slika jednak 20s u stvarnom vremenu. Duljina trajanja simulacije na području Podhuma iznosi 2 sata dok ona na području Platka traje nešto kraće i iznosi 1 sat i 40 minuta zbog toga što sadrži puno veći broj točaka.

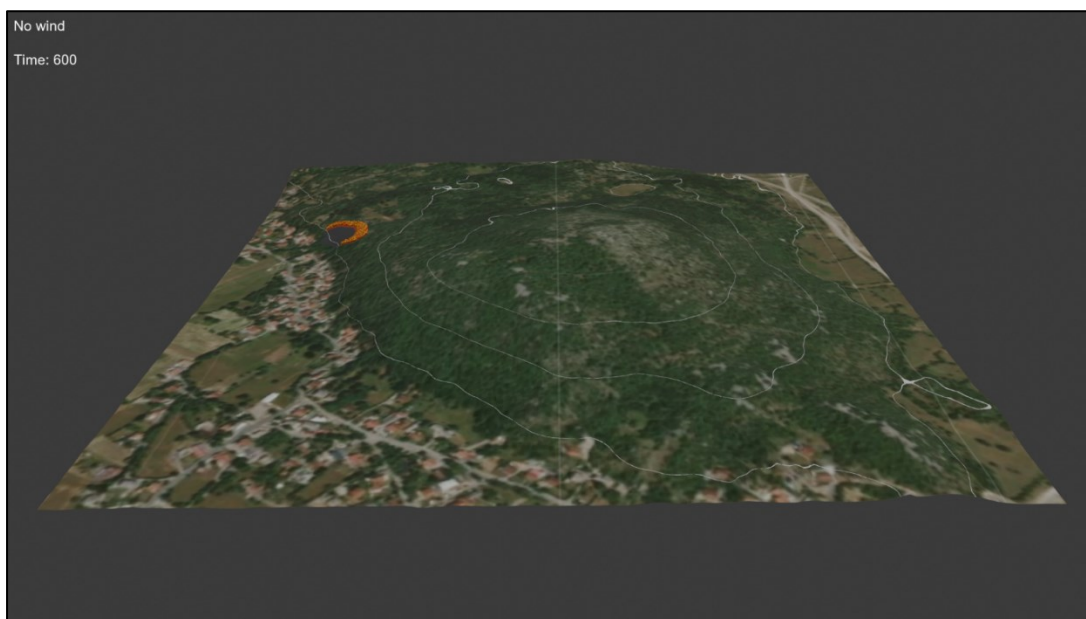
5.1. Rezultati vizualizacije na području Podhuma

Na sljedećoj slici je prikazan satelitski snimak područja na kojem je rađena simulacija. Njegova površina iznosi 1km^2 ($1\text{km} \cdot 1\text{km}$). Crvenom točkom je označena početna točka širenja požara. Pretpostavljeno je da je izvor požara nemarno bačen opušak nedaleko od ceste.



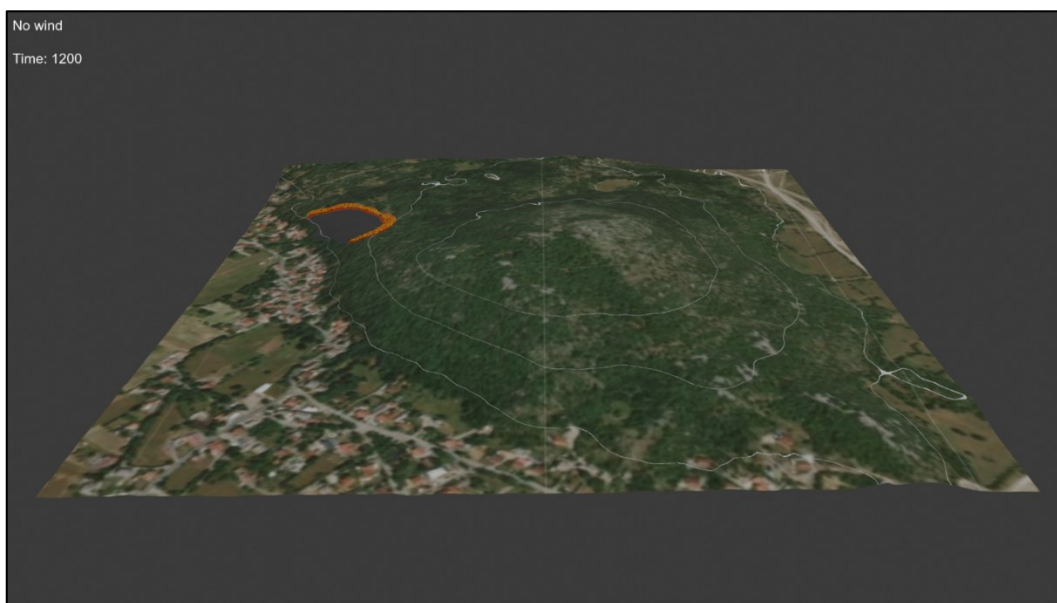
Slika 5.1. Početna točka širenja požara (Podhum)

Slijede prikazi pojedinih vremenskih trenutaka.



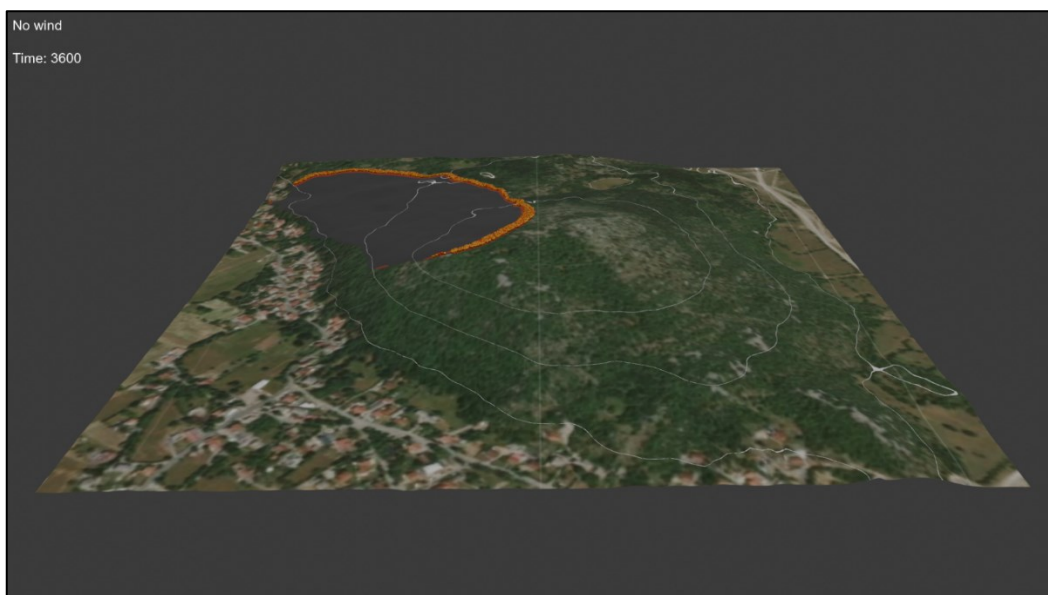
Slika 5.2. Razvijenost požara nakon 10 minuta

Može se vidjeti da se nakon 10 minuta požar nije previše proširio te da se kreće prema brdu, odnosno uzbrdo.

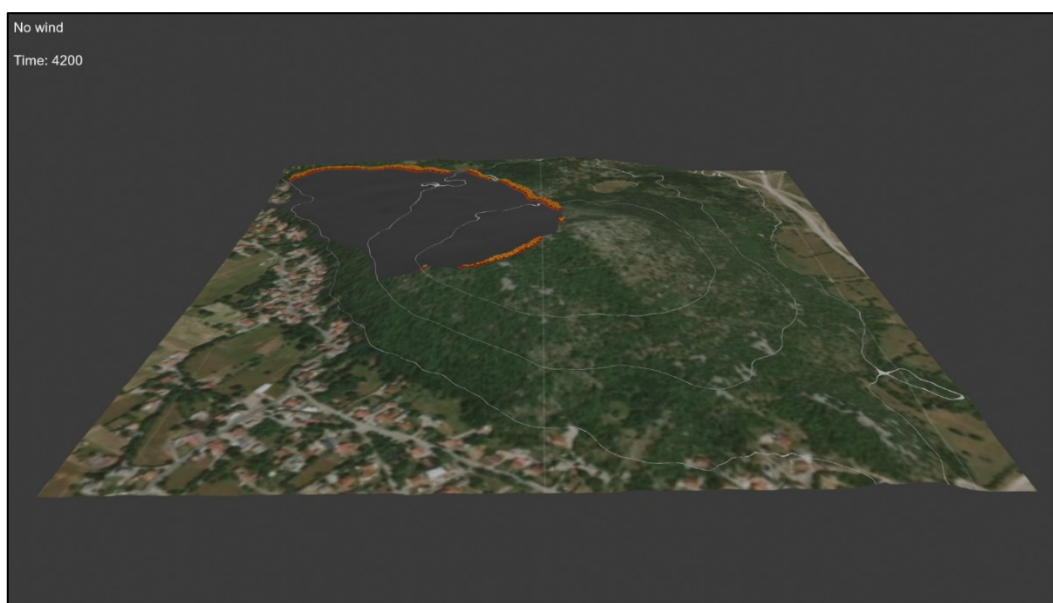


Slika 5.3. Razvijenost požara nakon 20 minuta

Zahvaćena površina se u narednih 10 minuta gotovo učetverostručila. Sada se može primijetiti da požar ne napreduje prema kućama, već nastavlja širenje prema brdu što odgovara modelu požara, odnosno činjenici da se vatra brže širi uzbrdo.

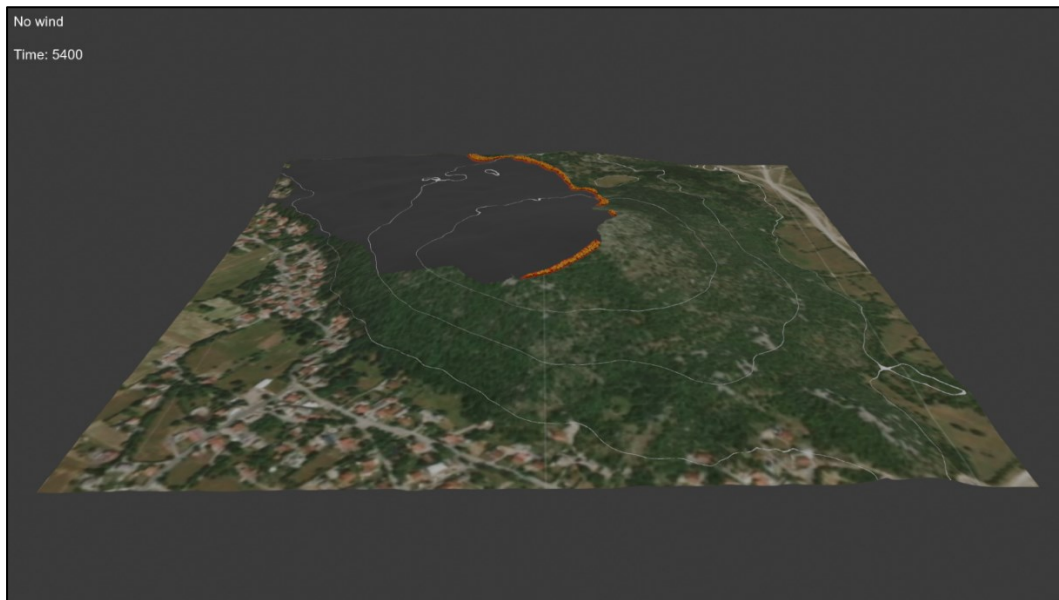


Slika 5.4. Razvijenost požara nakon 1 sata



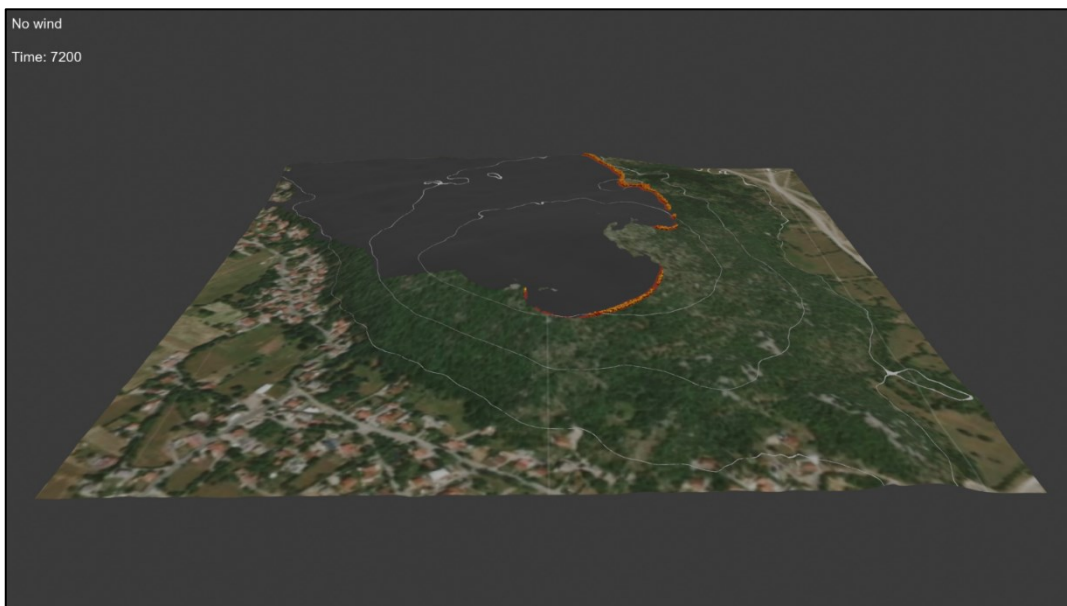
Slika 5.5. Razvijenost požara nakon 1 sata i 10 minuta

Na vrhu brda se nalazi kamenjar te se tamo vatra ne može širiti jednako brzo kao i na grmolikom području. Prema tome dolazi do usporavanja požara i smanjenja temperature što se na slici očituje prekidanjem vatrene fronte. Požar će i dalje napredovati na tom području, ali poprilično usporeno.



Slika 5.6. Razvijenost požara nakon 1 sata i 30 minuta

Požar napreduje i preko kamenjara kao što je spomenuto, ali sporije. Vidljivo je da se u zadnjih 20 minuta puno više proširio na grmolikom i travnatom području.

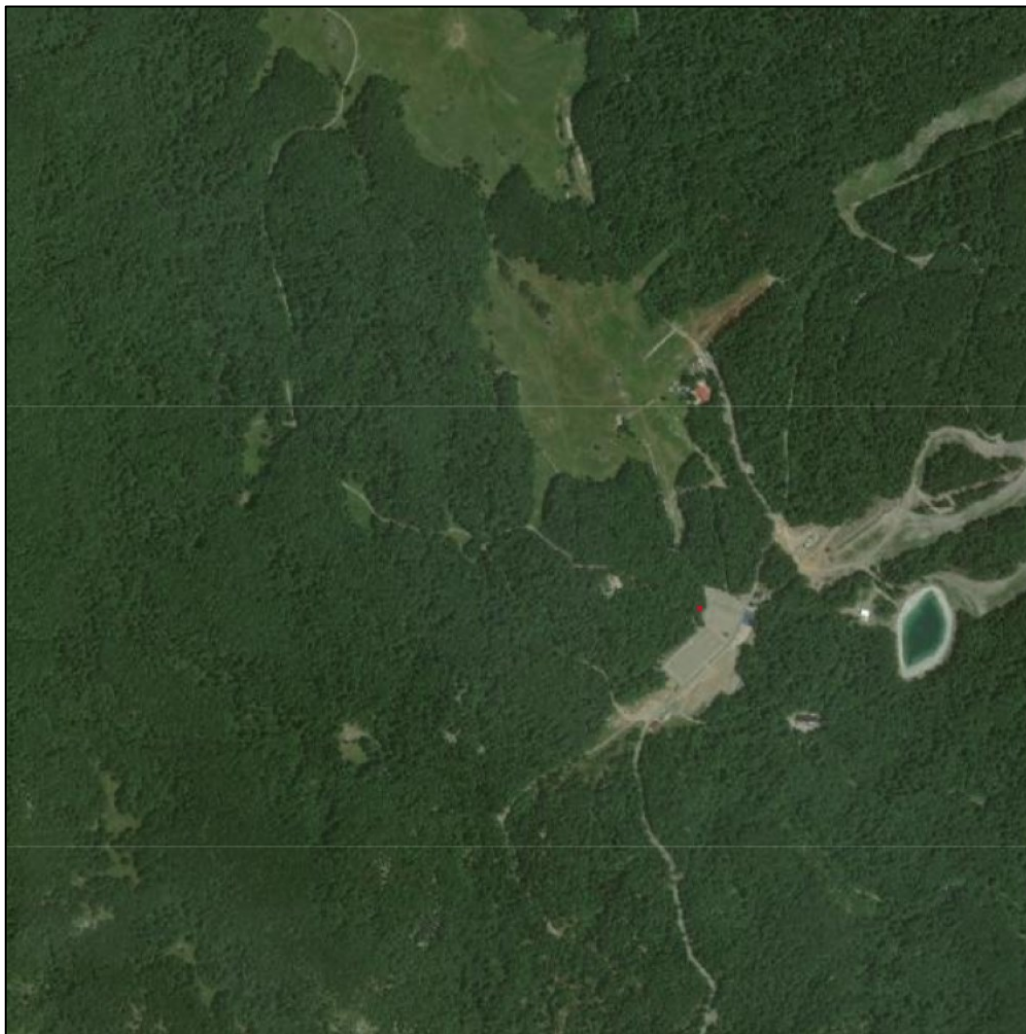


Slika 5.7. Razvijenost požara nakon 2 sata

Na kraju dolazi do sporijeg napredovanja jer se kreće širiti prema nizbrdo. Temperatura fronte također pada što se vidi zbog izostanka vatre te povećane količine crvene boje koja predstavlja žar.

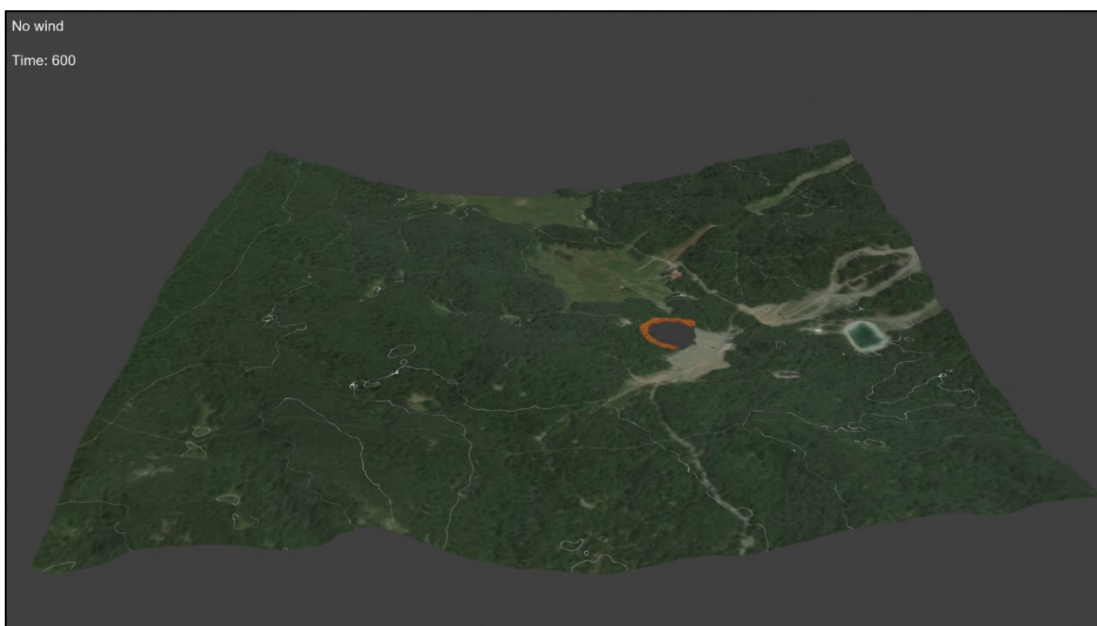
5.2. Rezultati vizualizacije na području Platka

Ovo područje je podosta veće nego ono od Podhuma. Obuhvaća površinu od 4km^2 ($2\text{km} \cdot 2\text{km}$). Kao i na prošlom primjeru, crvenom točkom je označen početak požara. Odabrano je upravo to područje jer se tamo nalazi zona za roštiljanje. Pretpostavljeno je da se vatra otela kontroli i zahvatila okolnu vegetaciju.



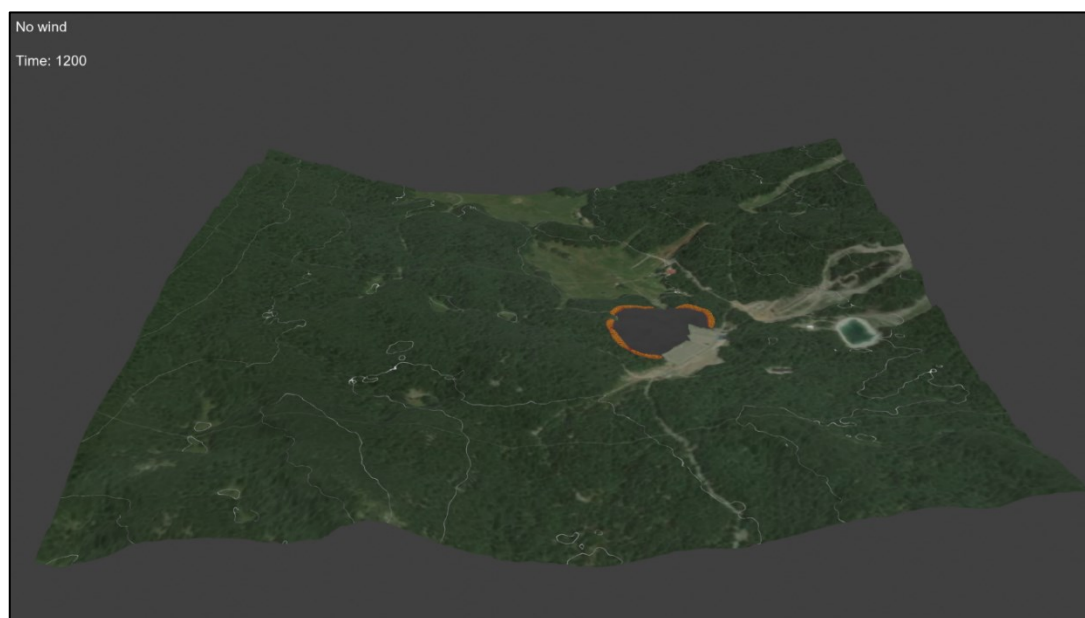
Slika 5.8. Početna točka širenja požara (Platak)

U nastavku su dani prikazi pojedinih vremenskih trenutaka.



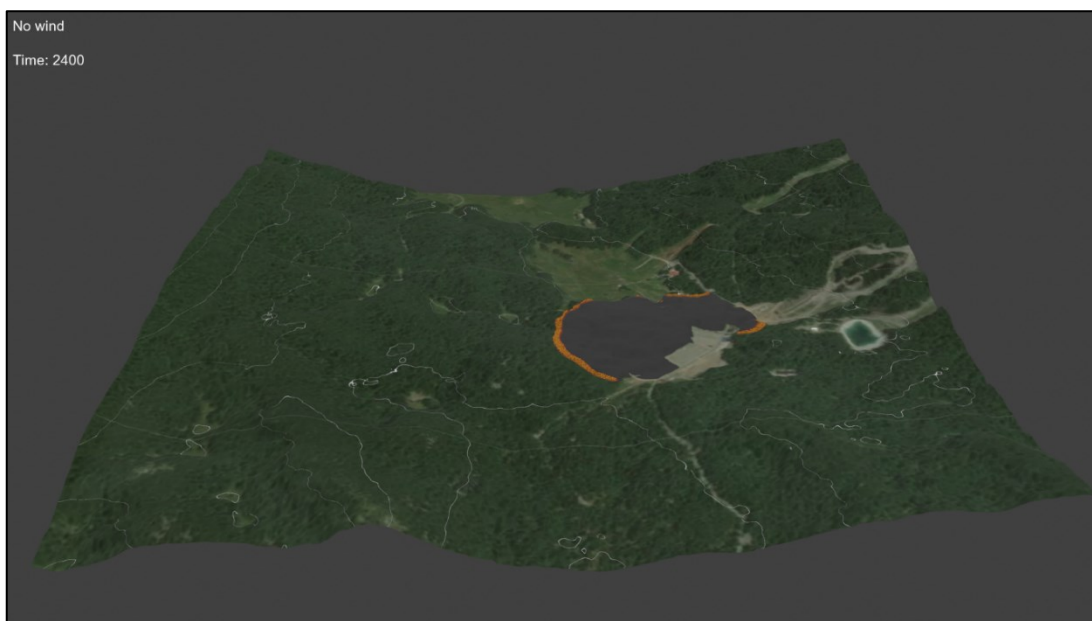
Slika 5.9. Razvijenost požara nakon 10 minuta

Kao što se može vidjeti, požar se kreće širiti u svim smjerovima ravnomjerno, ali ne i prema parkiralištu. Širi se jednoliko jer nema vjetra i okolna područja se nalaze na otprilike istoj nadmorskoj visini.



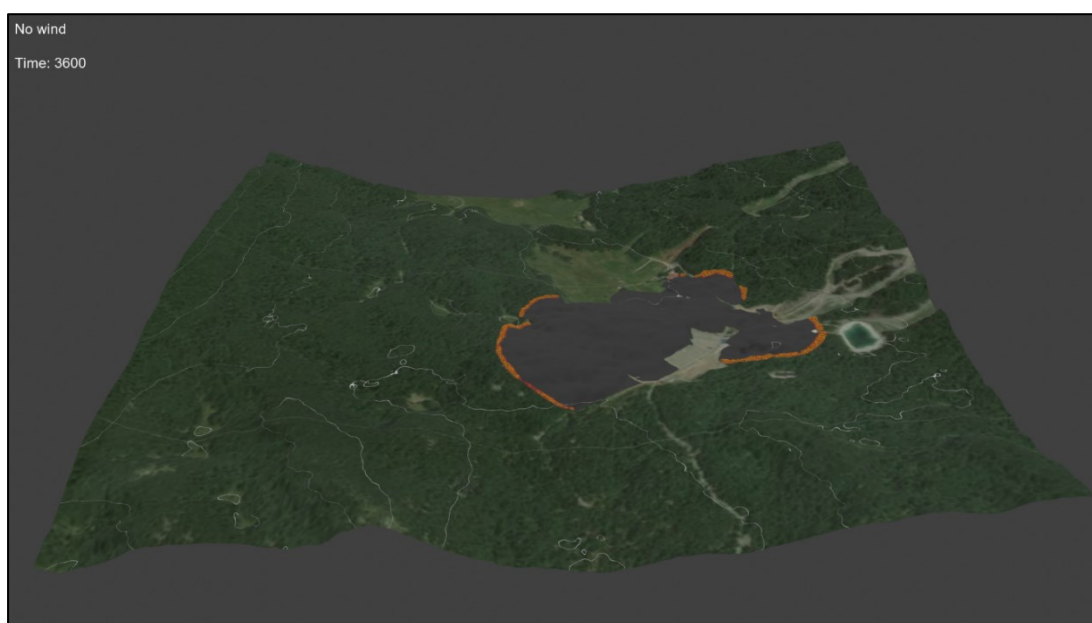
Slika 5.10. Razvijenost požara nakon 20 minuta

Vidljivo je da se fronta prekida na lijevom dijelu gdje nailazi na kamenjar te na gornjem dijelu gdje se nalazi travnjak.



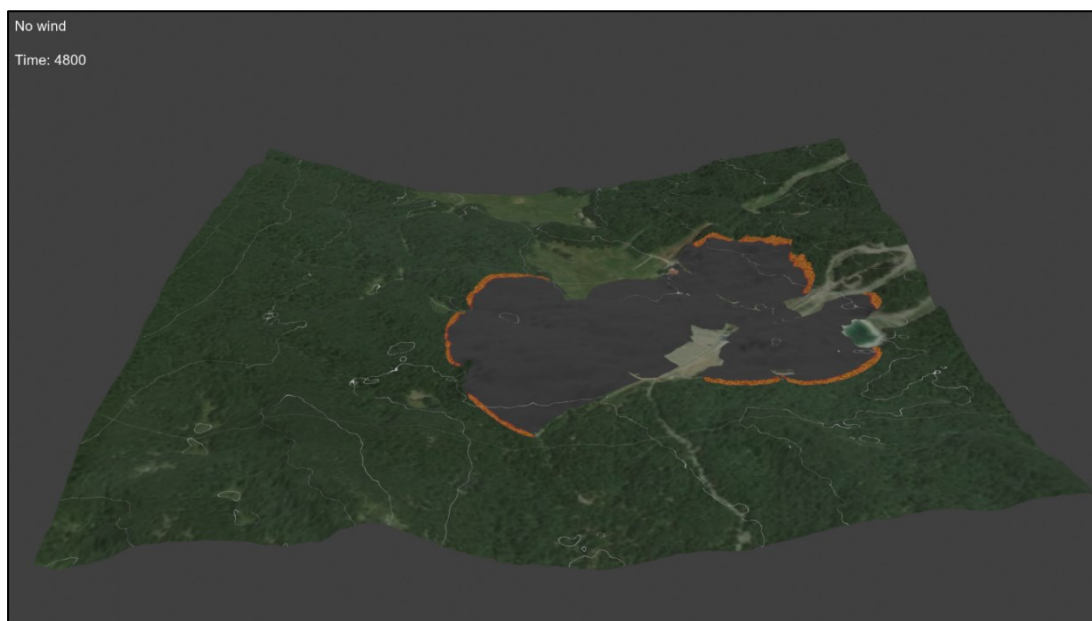
Slika 5.11. Razvijenost požara nakon 40 minuta

Požar se brže širi na šumskom nego na travnatom području gdje mu pada temperatura fronte. S desne strane se vidi da mu cesta priječi put pa nastavlja svoje širenje usporedno s njom.



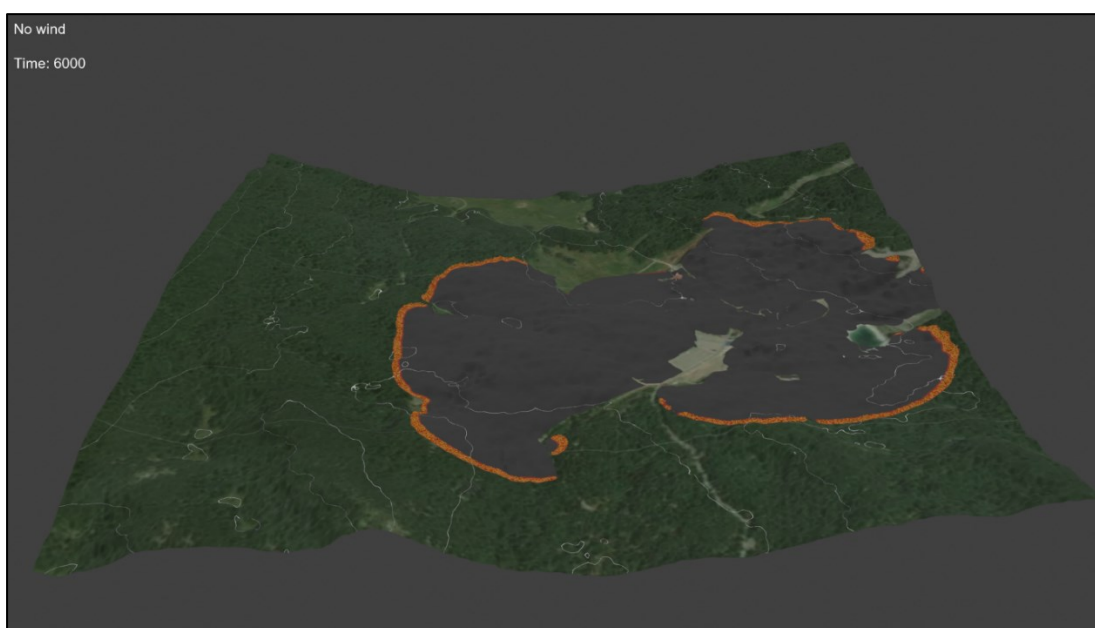
Slika 5.12. Razvijenost požara nakon 1 sata

Nakon određenog vremena požar je nadvladao cestu i krenuo se širiti s druge strane. Na travnatom području u sredini požar jedva da napreduje.



Slika 5.13. Razvijenost požara nakon 1 sata i 20 minuta

Kako je na gornjem desnom djelu nagib, dolazi do bržeg širenja požara pa je na tome mjestu veća količina vatre.



Slika 5.14. Razvijenost požara nakon 1 sata i 40 minuta

U samo 20 minuta opožarena površina se izrazito povećala. Može se vidjeti da fronta s donje lijeve strane sadrži više vatre nego na prošloj slici. Razlog tomu je suptilan nagib koji pomaže njenom širenju.

6. ZAKLJUČAK

Tema ovoga rada bila je vizualizacija i animacija računalne simulacije širenja požara. Požari su nekontrolirano širenje vatre i predstavljaju opasnost za ljude, životinje i prirodu. Njihov izvor može biti prirodni kao što je udar munje, no puno češće nastaju zbog ljudskih aktivnosti, bilo da je to nepažnja, nesretan slučaj ili namjerno podmetanje vatre.

Širenje požara ovisi o mnogo čimbenika među kojima su najvažniji atmosferski utjecaji, gorivo i topografija. Neki od ovih čimbenika su uzeti u obzir prilikom izrade matematičkog modela širenja šumskih požara. Taj model se temelji na reakcijsko-konveksijsko-difuzijskim jednadžbama koje su rješavane u programu OpenFOAM.

Odabrana su dva područja na kojima se simuliralo širenje požara, a to su Podhum i Platak. Prvo je bilo potrebno prikupiti podatke pojedinih područja što se činilo preko Python skripti, DEM datoteka te web-stranice koja omogućava mapiranje područja na kartama. Time su se odredila područja: šume, kamenjara, cesta, travnjaka... Nakon što su sakupljeni svi potrebni podaci, zapisani su u datoteke na rješavaču razumljiv način. Dobiveni rezultati su onda vizualizirani u programu Blender.

Vizualizacijom se moglo bolje i jasnije vidjeti kako požar napreduje. Promatrajući slike iz prethodnog poglavlja, moguće je uočiti da se simulirani požar širi kako je i očekivano. Drugim riječima, vidljivo je da brže napreduje uzbrdo nego nizbrdo te da prilikom nailaska na prepreku usporava. Također se može vidjeti kako se požar širi u obliku „vala“ što je i očekivano za model koji je korišten.

Dakle, ukoliko se simulacija dobro postavi, može davati poprilično precizne rezultate te kao takva može biti jako korisno sredstvo u borbi protiv požara. Osim toga, simulacijom se relativno jednostavno i brzo mogu mijenjati početni uvjeti kao što su: topografija terena, vrsta vegetacije, temperatura okoline i tako dalje. Prema tome, požar bi se mogao simulirati na bilo kojem mjestu, ali samo ako su potrebni podaci dostupni. Dakle, ovo bi se moglo smatrati i kao njihova mana.

Zaključno, simulacije mogu biti izrazito važne u borbi protiv požara zbog toga što se pomoću njih relativno lako mogu promijeniti početni uvjeti te brzo dobiti rješenja. Naravno, početne uvjete treba točno postaviti, a dobiveno rješenje razumjeti.

7. LITERATURA

- [1] Hrvatska enciklopedija: „Šumski požar“, s Interneta, <https://enciklopedija.hr/clanak/sumski-pozar>, 19.7.2024.
- [2] Hrvatska internetska enciklopedija: „Klasifikacija požara“, s Interneta, <https://enciklopedija.cc/index.php?title=Po%C5%BEar>, 19.7.2024.
- [3] Hrvatska internetska enciklopedija: „Šumski požar“, s Interneta, https://enciklopedija.cc/wiki/%C5%A0umski_po%C5%BEar#.C5.A0tete_od_.C5.A1umskih_po.C5.BEara, 19.7.2024.
- [4] Hrvatska enciklopedija: „Požar“, s Interneta, <https://enciklopedija.hr/clanak/pozar>, 19.7.2024.
- [5] Hrvatska enciklopedija: „Toplina“, s Interneta, <https://enciklopedija.hr/clanak/toplina>, 19.7.2024.
- [6] Government of South Australia, Department for Environment and Water: „The science behind fire behaviour“, s Interneta, <https://www.environment.sa.gov.au/topics/fire-management/fire-science-and-planning/fire-behaviour>, 20.7.2024.
- [7] Joint Research Centre: „Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2022“, s Interneta, https://effis-gwis-cms.s3.eu-west-1.amazonaws.com/effis/reports-and-publications/annual-fire-reports/Annual_Report_2022_final_240126_print.pdf, 20.7.2024.
- [8] Hrvatska internetska enciklopedija: „Umjerena klima“, s Interneta, https://enciklopedija.cc/wiki/Umjerena_klima, 22.7.2024.
- [9] „OpenFOAM“, s Interneta, <https://www.openfoam.com/>, 22.7.2024.
- [10] Mandel, J i dr.: „A wildland fire model with data assimilation“, s Interneta, <https://arxiv.org/pdf/0709.0086>, 23.7.2024.
- [11] „Polyline Tool“, s Interneta, <https://www.keene.edu/campus/maps/tool/>, 10.5.2024.
- [12] United States government: „What is a digital elevation model (DEM)?“, s Interneta, <https://www.usgs.gov/faqs/what-digital-elevation-model-dem>, 25.7.2024.

- [13] „Blender About“, s Inteneta
<https://www.blender.org/about/>, 26.7.2024
- [14] „Blender License“, s Interneta,
<https://www.blender.org/about/license/>, 26.7.2024.
- [15] „Blender Modifiers Introduction“, s Interneta
<https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/modifiers/introduction.html#example>,
26.7.2024.
- [16] „Blender Glossary“, s Interneta,
<https://docs.blender.org/manual/en/latest/glossary/index.html>, 26.7.2024.
- [17] „Blender Rendering Introduction“, s Interneta
<https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/introduction.html>, 26.7.2024.
- [18] „Path Tracing Vs. Rasterization: Understanding Cycles And Blender Internal Engines“, s
Interneta,
https://blendernotes.com/path-tracing-vs-rasterization-understanding-cycles-and-blender-internal-engines/?utm_content=cmp-true, 26.7.2024.
- [19] „Blender Workbench Introduction“, s Interneta,
<https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/workbench/introduction.html>, 29.7.2024.
- [20] „Blender EEVEE Introduction“, s Interneta,
<https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/eevee/introduction.html>, 29.7.2024.

8. SAŽETAK

Tema ovoga rada bila je izrada animacije i vizualizacije računalne simulacije širenja šumskog požara. Napravljene su dvije simulacije, jedna na području Podhuma, a druga na području Platka. Prvo je bilo trebalo prikupiti sve potrebne podatke kao što su podaci o: elevaciji, vegetaciji, okolnoj temperaturi itd. Vegetacija se mapirala preko Google mapa, a vrijednosti elevacije su izvučene iz digitalnog modela reljefa. Potom su, koristeći Python skripte, podaci zapisani u datoteke na način koji je razumljiv rješavaču. Rješavač, odnosno program, u kojem su simulacije rađene bio je OpenFOAM, a dobiveni rezultati su onda vizualizirani u Blender-u.

Ključne riječi: šumski požar, računalna simulacija, OpenFOAM, Blender

9. ABSTRACT

The topic of this paper was to make an animation and visualization of a computer simulation of wildfire spread. Two simulations were made, one in the area of Podhum and the other in the area of Platak. First it was needed to collect all the necessary data like the data about: elevation, vegetation, ambient temperature etc. Vegetation was mapped via Google Maps and the elevation values were extracted from the digital elevation model. Then, using Python scripts, the data was written in files in a way that was understandable to the solver. The solver, that is the program, in which the simulations were made was OpenFOAM, and the obtained results were then visualized in Blender.

Key words: wildfire, computer simulation, OpenFOAM, Blender