

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**RAČUNALNE SIMULACIJE ŠIRENJA ŠUMSKIH POŽARA NA
PODRUČJU OTOKA PAŠMANA**

Rijeka, 8.ožujka 2019.

Gabriel Marvin

0069076974

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**RAČUNALNE SIMULACIJE ŠIRENJA ŠUMSKIH POŽARA NA
PODRUČJU OTOKA PAŠMANA**

Mentor: doc. dr. sc. Stefan Ivić

Rijeka, 8.ožujka 2019.

Gabriel Marvin

0069076974

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

IZJAVA

Kojom ja, Gabriel Marvin, JMBAG: 0069076974 student Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci sukladno članku 9. Pravilnika o završnom radu i završnom ispitu preddiplomskog sveučilišnog studija strojarstva, izjavljujem da sam završni rad naslova „Računalne simulacije širenja šumskih požara na području otoka Pašmana“ samostalno izradio pod mentorstvom doc. dr. sc. Stefana Ivića.

Rijeka, 8.ožujka 2019.

Gabriel Marvin

0069076974

SADRŽAJ

1. UVOD	2
2. OPĆENITO O ŠUMSKIM POŽARIMA	3
2.1. Rasprostranjenost požara u svijetu	4
2.2. Požari u Hrvatskoj	6
3. FIZIKALNI OPIS POŽARA	7
3.1. Mehanizmi širenja požara.....	9
3.2. Utjecaj vjetra na širenje požara	11
3.3. Utjecaj konfiguracije terena na širenje požara	11
4. POSTOJEĆI MODELI ŠUMSKIH POŽARA	13
5. MODEL TEMELJEN NA TRANSPORTNIM JEDNADŽBAMA	15
6. MODELIRANJE POŽARA NA OTOKU PAŠMANU	19
6.1. Otok Pašman.....	19
6.2. Odabir parametara modela.....	20
7. REZULTATU SIMULACIJA ŠIRENJA POŽARA	24
7.1. Vizualizacija računalnih simulacija.....	24
7.2. Širenje požara bez utjecaja vjetra	28
7.3. Širenje požara uz utjecaj vjetra.....	35
8. ZAKLJUČAK	39
9. LITERATURA	41
10. SAŽETAK.....	43
11. ABSTRACT	44

1. UVOD

Hrvatska je poznata po mediteranskoj klimi koju obilježavaju duga topla ljeta i blage zime. Geografski položaj hrvatskog teritorija, koji se nalazi u umjerenom klimatskom pojasu sjeverne polutke Zemlje, pogodan je za nastanak šumskih požara. Kako bi se izbjegle prekomjerne štete za vrijeme šumskih požara, ključan je faktor planiranje i organiziranje akcije gašenja požara. U današnje vrijeme strategija gašenja požara temelji se na iskustvu vatrogasnih službi o kretanju vatrene fronte, te se na taj način može efektivno limitirati širenje plamena. Ova metoda, iako poprilično efektivna, ima svoje mane, a to je nepredvidljivost širenja fronte. Razvijanje računalnih simulacija širenja požara, koja predviđa kretanje požara omogućilo bi se lakše planiranje vatrogasnih akcija. Tema ovog završnog rada je izrada jedne takve računalne simulacije koja će prikazivati širenje požara na jednom od hrvatskih otoka. Matematički model kojim se opisuje kretanje požara, zasnovan je na sustavu parcijalnih diferencijalnih jednadžbi širenja topline prilikom izgaranja goriva. Prikazan je način prilagođavanja parametara na jednostavnim primjerima kao što je ravni teren bez utjecaja vjetra i reljefa, širenje fronte na ravnom terenu uz utjecaj vjetra itd. Cilj ovog rada je prikazati širenje vatrene fronte na području otoka Pašmana uz što realniji prikaz reljefa i ostalih uvjeta koji utječu na prijenos topline. Model je implementiran u programskom paketu OpenFOAM 5.0. Ovaj rad nudi temeljiti opis postupka izrade simulacije šumskog požara, od osnovnih fizikalnih svojstva širenja požara do implementacije matematičkog modela. U prvom i drugom poglavlju objašnjen je pojam požara, pogodna mjesta za njegovo nastajanje kao i rasprostranjenost u svijetu, a posebno u Hrvatskoj. U trećem poglavlju su objašnjena fizikalna i kemijska svojstva požara, te mehanizmi koji sudjeluju u širenju šumskog požara, te kako utječu vjetar i reljef na njegovo širenje. O postojećim modelima i njihovim razlikama se govori u poglavlju broj 4. Detaljan uvid u matematički opis korištenog modela i implementaciju pomoću numeričke metode u programu OpenFOAM 5.0 se govori u poglavljima 5. i 6. U sedmom poglavlju prikazani su dobiveni rezultati na odabranom području na otoku Pašmanu. Prikazane su dvije simulacije jedna sa, te jedna bez utjecaja vjetra. Na kraju ovog rada doneseni su zaključci i smjernice za daljnja istraživanja kao i ukupan pregled rada.

2. OPĆENITO O ŠUMSKIM POŽARIMA

Šumski su požari prirodne katastrofe koje opisuju nekontrolirano, stihijsko kretanje vatre u šumskom okruženju. Redovita su pojava u različitim dijelovima svijeta i neizbježan dio ekosustava. Šumske požare razlikujemo po uzrocima njihovog nastanka, a to su prvenstveno čovjek, udar groma, visoke temperature itd. Poprilično su destruktivni prema flori i fauni, te nerijetko i prema ljudskim naseljima.

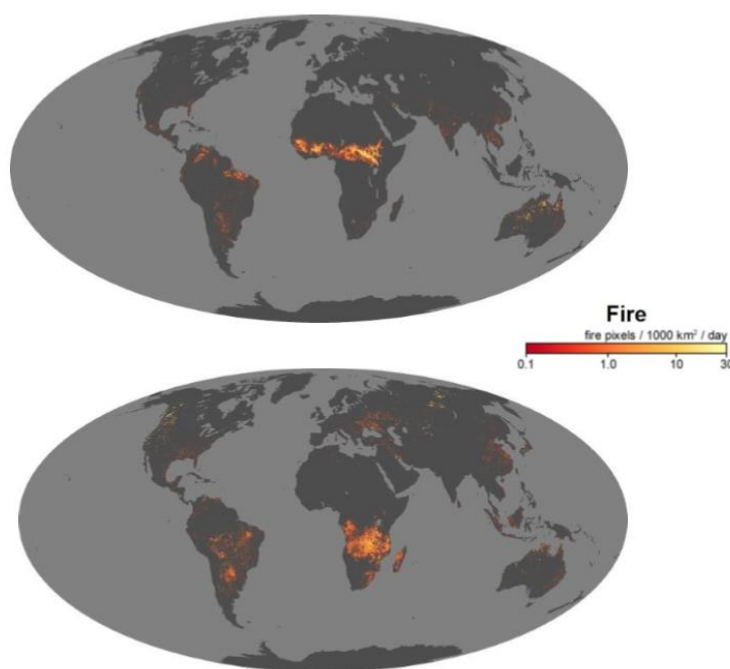


Slika 2.1. Zapaljena vatra

S druge strane, požari igraju bitnu ulogu u obnavljanju šuma i obogaćenju tla hranjivim tvarima, što pospješuje obnavljanje šumskih područja, također manji požari stvaraju izgorene džepove koji sprječavaju širenje većih požara koji mogu nanijeti puno veću štetu. Manji požari su poželjni također iz razloga jer sagorijevaju na područjima gdje se nakuplja velika količina goriva, iz tog razloga ljudi koriste kontrolirane požare za sprečavanje nastanka većih. No s druge strane požari u našem društvu predstavljaju veliku opasnost u smislu nanošenja materijalne štete i izravnu opasnost za ljudski život i zdravlje. Stoga velika se pažnja posvećuje borbi protiv požara koja postaje sve teža u novije doba zbog depopularizacije ruralnih područja. Globalno zatopljenje također pospješuje nastanak šumskih požara, potrebno je stoga razviti efikasnije metode koje će olakšati predviđanje kretanja požara. U tom slučaju veliku ulogu imaju računalne simulacije koje mogu dovoljno precizno opisati ovaj fenomen.

2.1. Rasprostranjenost požara u svijetu

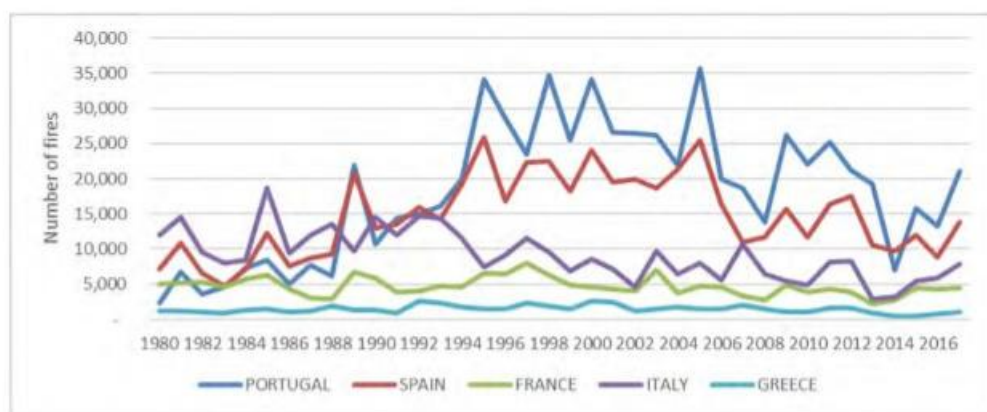
Jednostavni klimatski uvjeti koje zahtijevaju požari mogu se naći gotovo u svakom kutku Zemlje. Pogodni uvjeti su dulji sušni periodi, koji suše vegetaciju te smanjuje udio vlage, i relativno srednje temperature koje će zapaliti i pospješiti gorenje suhe vegetacije. Područja visoke opasnosti od požara u svijetu ovisna su o promjenama godišnjih doba, a veća koncentracija događa se na području tropskih i umjerenim klimatskim pojasevima u mjesecima oko ljeta i za vrijeme sušnih razdoblja.



Slika 3.1.. Zabilježeni šumski požari u prosincu 2017. (gore) i kolovozu 2018. godine (dolje) (Izvor: [1])

Slika prikazuje dvije ilustracije Zemlje gdje gornja prikazuje požare koji su se dogodili u prosincu 2017. i kolovozu 2018. Užarene točke prikazuju učestalost požara na 1000 km^2 u danu. Najveći broj požara događa se upravo u tropskom i suptropskom području savane u Africi i Južnoj Americi. Na mjestima gdje bi se zbog ekstremnih temperatura pretpostavilo da će lako doći do požara, uopće ne dolazi do zapaljenja iz razloga što su to velike površine zemlje bez vegetacije. U takva područja spadaju razne pustinje koje se nalaze u tropskom i suptropskom području kao što su Sahara, Kalahari, te unutrašnjost Australije. Suprotno tome, na područjima velikih borealnih šuma Sibira, Aljaske i Kanade gdje temperature tokom zime padaju daleko ispod ništice može doći do velikih razarajućih požara zbog velike količine guste crnogorične vegetacije. Svake godine u Rusiji, gdje u naseljenim mjestima ekosustav nije prilagođen velikim

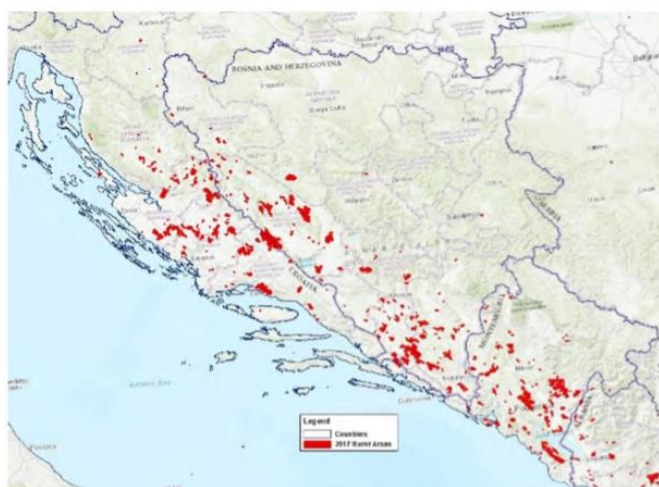
požarima, nekoliko milijuna hektara ostaje spaljeno zbog šumskih požara, a u Kanadi i Aljasci brojke nisu toliko različite. Kontinentalna klima u tim područjima je obilježena vrućim ljetima i suhim hladnim zimama u kojima je šumsko tlo prepuno suhih iglica koje su lako zapaljive. Takva borealna područja doživljavaju najveća povećanja broja požara uslijed klimatskih promjena. Mediteransko područje je u ovom slučaju jako zanimljivo jer sadrži pogodnu klimu za nastanak požara i bogato je lako zapaljivom vegetacijom. Sitni požari su izuzetno česti na mediteranskom području, te su bitan dio ekosustava. Sitni požari se također koriste kako bi se lakše upravljalo resursima. Na području južne Europe svake se godine zapali najmanje 50 000 požara koji unište od 700 000 do 1 milijuna hektara površine. Najzastupljeniji su na Balkanskom području, Grčkoj, Španjolskoj, te Italiji.



Slika 3.2. Godišnji broj šumskih požara u južnoj Europi u razdoblju od 1980. do 2016. godine (Izvor: [2])

2.2. Požari u Hrvatskoj

Analizom Hrvatske klime i statističkim podacima kroz povijest možemo zaključiti da se Hrvatska nalazi na području gdje je najveća opasnost od požara uslijed ljetnih mjeseci. Rekordne temperature za ovo podneblje zabilježene su upravo u zaleđu Dalmacije na području Ploča 4.8.1981. kada je temperatura dosegla rekordnih 42,8 °C. Zbog razlike u lokaliziranosti vegetacije u državi, Dalmacija ima pogodnije klimatske i vegetacijske uvijete za nastanak i širenje šumskih požara. Gdje se s druge strane kroz povijest može primijetiti da u unutrašnjosti zemlje požari nisu toliko prisutni kao u priobalju. Otpornost kontinentalne Hrvatske da se opire ovim prirodnim katastrofama su prostrane nizinske livade koje ne pogoduju širenju vatrene fronte.



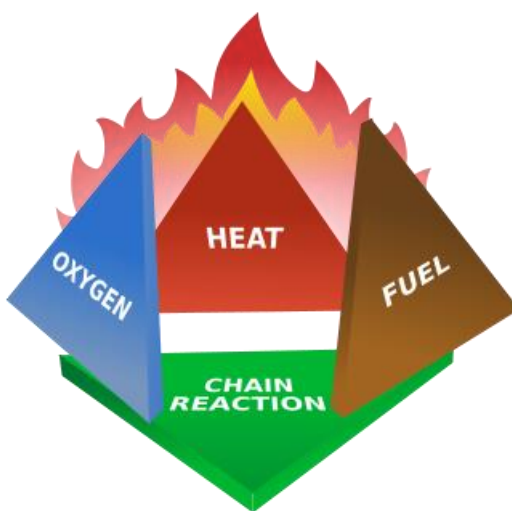
Slika 4.1. Izgorene površine na prostorima Hrvatske, Bosne i Hercegovine i Crne Gore iz 2017. godine (Izvor: [2])



Slika 4.2. Požar u blizini Splita i Podstrane 2017. godine

3. FIZIKALNI OPIS POŽARA

Vatra je brza oksidacija materijala egzotermnim kemijskim procesom gorenja. Procesom gorenja se oslobađaju velike količine energije u obliku topline, svjetlosti, te raznih produkata. Gorući plin u obliku svjetlećeg plamena emitira se kada temperatura goriva dosegne točku zapaljenja, te može dosegnuti točku kada se pretvara u požar koji najviše prijeti flori, fauni i ljudskim životima. Vatra nastaje kada se visoko gorući materijal, u kombinaciji sa okruženjem ili tvari bogatom kisikom, dolazi u kontakt sa izvorom topline. Tada nastaje lančana reakcija koja rezultira širenjem vatre. Na slici je prikazan vatreni tetraedar.



Slika 6.1. Vatreni tetraedar

Uzročnik većine šumskih požara je čovjek koji svojim nemarom stvara pogodne uvjete za njihovo nastajanje. Požar može biti rezultat neugašene cigarete bačene u suho raslinje, zanemareni ostatci kontrolirane vatre koja se koristila za pripremanje hrane, odlaganje zapaljivog otpada u prirodi, kvar instalacija na otvorenom, te vrlo često namjerna potpala zapaljivih površina. S druge strane požari mogu nastati prirodnim uzrokom tj. bez utjecaja čovjeka. Udar groma u zemlju prekrivenu suhim lišćem ili u suho drvo je vrlo čest uzrok šumskih požara koje je teško spriječiti zbog nepredvidive prirode gromova.

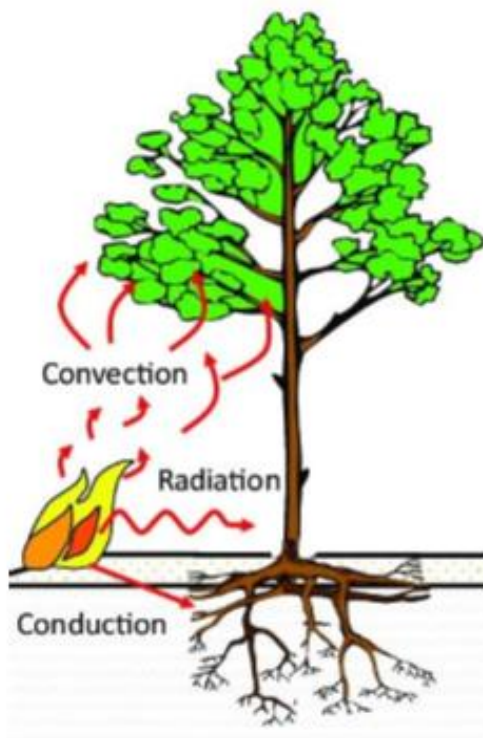


Slika 6.2. Zapaljena unutrašnjost debla zbog udara groma

Različite vrste vegetacije različito utječu na brzinu širenja, količini emitiranja topline i štetnosti za okoliš. Gorivo na području otoka Pašmana koje moramo uzimati u obzir dijelimo na nekoliko vrsta. Visoko raslinje koje obuhvaća vazdazelenu vegetaciju hrasta crnike, alepskog i crnog dalmatinskog bora, te makiju koja je najrasprostranjeniji ekosustav Mediterana koji obuhvaća raslinje visoko do 4 metra. Raslinje niže od makije sačinjavaju suhe niske trave, nakupine sitnog drva i gomile raspadajućih iglica i lišća više vegetacije. Temperature zapaljenja niske vegetacije makije iznosi oko 270 do 30 °C [3]. Svojstva požara kao što su njegova brzina širenja, brzina izgaranja, temperatura i visina plamena, te količina i gustoća generiranog dima će ovisiti o vrsti i stanju spomenutih goriva. Također nesmiemo zaboraviti utjecaj godišnjih doba koji određuju udio vlage i veću gustoću goriva. Nastajanju požara najviše pogoduje prizemno raslinje niže i srednje visine jer sadrži najmanji udio vlage, pogotovo u ljetnim mjesecima, te jer se brzo zapali i brzo izgara. Šumski požari u većini slučajeva nastaju zapaljenjem nižih slojeva vegetacije.

3.1. Mehanizmi širenja požara

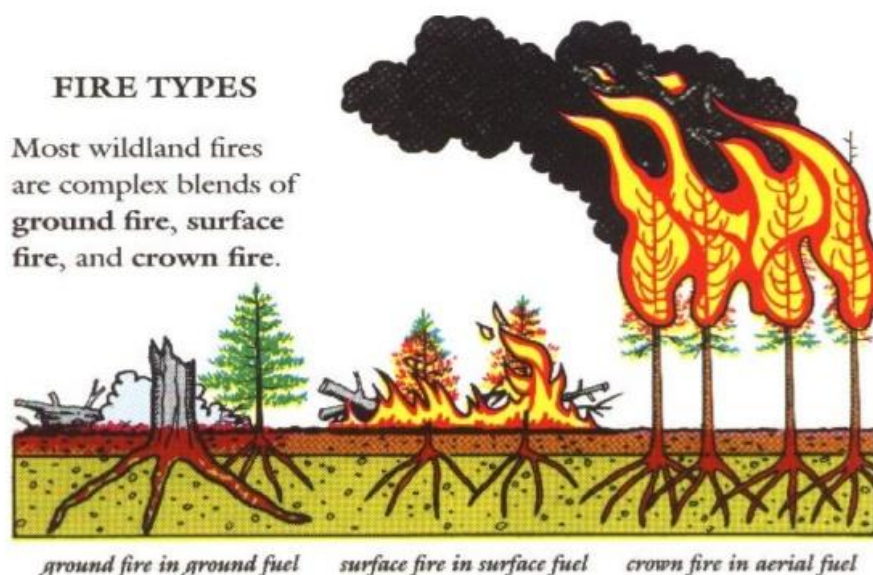
Širenje vatre u šumskim požarima je iznimno složen proces, no može se opisati pomoću tri mehanizma širenja topline: provođenjem, zračenjem i konvekcijom kao što je prikazano na Slici.



Slika 6.1.1. Mehanizmi širenja požara: konvekcijom , zračenjem i kondukcijom

Većina šumskih požara mješavina su podzemnog, prizemnog i ovršnog požara. Podzemni požar se širi provođenjem topline, prizemni zračenjem i ovršni konvekcijom. Najopasnijim se smatraju ovršni požari zbog velike brzine širenja i velike emisije topline. Požar započinje povećanjem temperature do temperature zapaljenja u području nižeg raslinja, zapaljenje goriva pokreće niz reduktivnih reakcija kao što su zagrijavanje i dehidriranje goriva, tinjanje i žarenje goriva kojim se proizvode različiti nusprodukti.

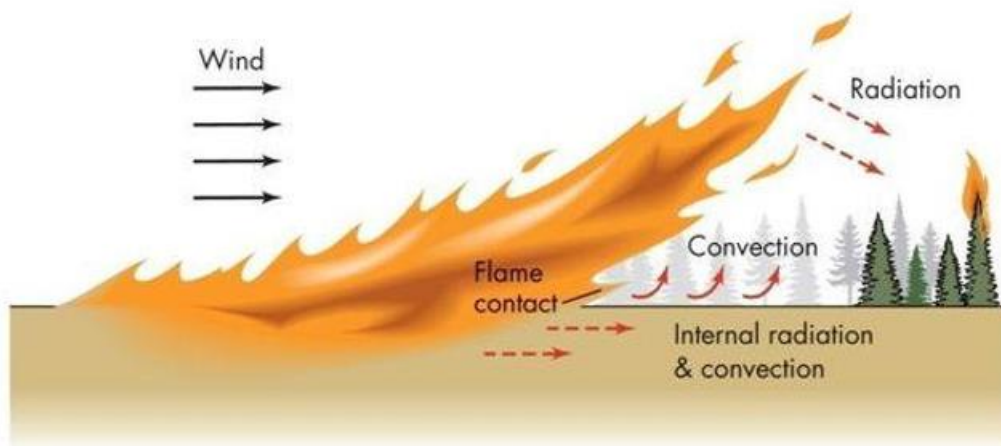
Toplina koja nastaje širi se provođenjem podzemnim i zračenjem ovršnim požarom, te za sobom ostavlja trag pougljenjenog materijala koji emitira gusti sivi dim u atmosferu. Nakon određenog vremena ovisno o gustoći goriva vatra se postupno gasi, tj. gubi energiju. U modelu nije opisano podzemno širenje požara zbog njegove očite kompleksnosti i neistraženosti pojave. Osim vegetacije na širenje požara izuzetno utječu vremenski uvjeti i topografija terena. Vremenski uvjeti koju utječu na ponašanje požara su vjetar, oborine, vlažnost zraka i temperatura okoline. Vlažnost i temperatura utječu na lakoću kretanja fronte. Veća vlažnost goriva i niska temperatura znači da će se gorivo morati duže vrijeme sušiti i zagrijavati kako bi se dosegla točka zapaljenja suhog goriva. Padaline očito utječu na vlažnost goriva i često igraju ulogu prirodnog načina gašenja požara.



Slika 6.1.2. Tipovi požara

3.2. Utjecaj vjetra na širenje požara

Vjetar s druge strane ima posebno važnu ulogu u širenju požara. Vjetar olakšava prijenos topline konvekcijom što ubrzava vatrenu frontu.

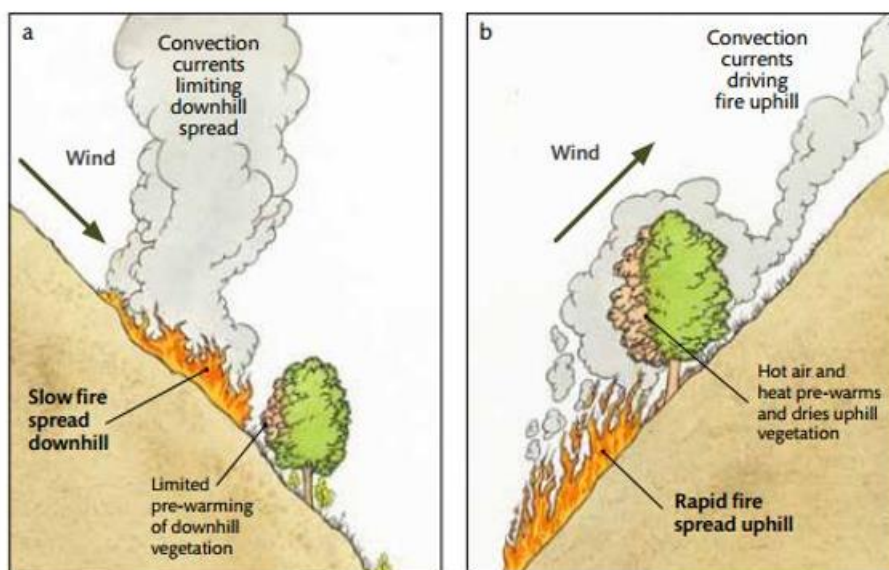


Slika 6.2.1. Utjecaj vjetra na širenje vatrene fronte

Brzina širenja šumskih požara uz prisustvo vjetra se značajno povećava. U uvjetima bez vjetra na ravan terenu požar se širi brzinom od 0,001 m/s do 0,05 m/s [5] ovisno o raspodjeli goriva. U uvjetima gdje ima vjetra također na ravnom terenu brzina se drastično povećava te doseže brzine od 2 m/s do 3,5 m/s [6][7], naravno u ovisnosti o brzini vjetra. Vjetar također povećava dotok kisika što na neki način ima efekt puhala koji se koristi za povećavanje temperature i intenziteta vatre u pećima. Također uz prisustvo vjetra povećava se opasnost točkastog širenja požara, gdje vjetar raznosi užarene čestice koje mogu pokrenuti nove požare što povećava faktor nepredvidivosti.

3.3. Utjecaj konfiguracije terena na širenje požara

Topografija ili reljef nekog područja očitava se u obliku uzbrdica i nizbrdica koje imaju različite efekte na širenje šumskog požara. Požar koji se nalazi na kosini težit će većoj brzini kretanja prema gore, uz kosinu jer se topli zrak prirodnom konvekcijom uzdiže prema gore. Vegetacija koja se nalazi iznad požara na kosini će se ubrzano sušiti i zagrijavati zato će se požar širiti brže uzbrdo. Suprotno tome, vegetacija niz kosinu će primati manje količine topline stoga će se požar sporije širiti nizbrdo.

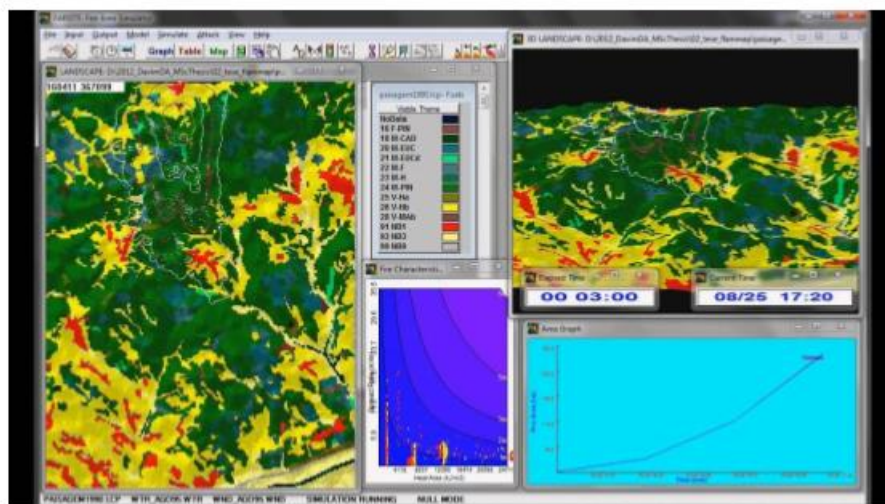


Slika 6.3.1. Ponašanje požara na uzbrdici odnosno nizbrdici

Prema istraživanjima provedenim pomoću modela FIRETEC došlo se do zaključka da brzina širenja na nagibu od 20 do 30 stupnjeva je 2 do 4 puta veća za razliku od ravne površine [8][9]. Niz kosinu požar će se rijetko širiti osim u slučaju kada je potpomognut vjetrom.

4. POSTOJEĆI MODELI ŠUMSKIH POŽARA

Modeli šumskih požara postoje kako bi bili od pomoći pri predviđanju i gašenju stvarnih požara. Oni olakšavaju planiranje operacije gašenja, te povećavaju sigurnost. Modeli koji simuliraju ponašanje požara trebaju pružati podatke o brzini, smjeru širenja i količini topline koju požar stvara. S obzirom da je modeliranje šumskih požara složen fizički problem, potrebno je na sve moguće načine pojednostaviti proces na način da se dođe do razumljivog omjera preciznosti rezultata i brzine izvođenja kalkulacija. Jedino se na takav način trenutno može doći do relevantnog modela. Stoga trodimenzionalni model koji bi bio rješavan direktnom numeričkom simulacijom (DNS), uz sva realna fizikalna i kemijska svojstva nije moguć. Većina modela trenutno u korištenju se baziraju na DDDAS(*Dynamic Data-Driven Application System*) metodama koje uključuju determinističke karakteristike kao što je praćenje kroz vrijeme, optimizacija itd. Koje aplikaciji koja je u izvedbi dinamičko dodavanje podataka. Na postojećim modelima postavlja se zahtjev da izvršavaju simulacije brzinom većom nego se požar odvija u stvarnosti kako bi se akcije gašenja mogle efektivnije planirati. Pojednostavljeni modeli dijelimo na empirijske i polu-empirijske koji su temeljeni na realnim iskustvima i saznanjima o požarima koji su se već dogodili. Empirijski i polu-empirijski modeli iako veoma precizni, specijalizirani su na samo jedno područje što ih čini neupotrebljivima za šire korištenje. Jedan primjer takvog modela je model FIRESITE [13] koji je temeljen na ispitivanjima u Kanadi. Suprotno empirijskim i polu-empirijskim modelima postoje još i modeli temeljeni na fizikalnim procesima koji su univerzalno primjenjivi na svim područjima. Oni jednostavniji baziraju se prvenstveno na zračenju topline, dok je utjecaj vjetra i nagiba terena predstavljen konvekcijom. U suštini pokušava se pronaći pogodan omjer složenosti modela i brzine izvođenja. Rješenje predstavlja model opisan u ovom radu koji se temelji na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama energije, brzina reakcije goriva i bilance dostupnog goriva. Primjer modela veće složenosti uzimaju u obzir međudjelovanje atmosfere i požara tj. utjecaj emitirane energije na vremenske uvijete u okolini. FIRETEC [12], „Coupled Atmosphere-Wildland Fire-Environment model“ ili CAWFE [10], „WRF-Fire“ [11] su neki primjeri aktualnih složenih modela za simulaciju šumskih požara. Prethodno navedeni modeli koriste DDDAS metode kako bi korigirali podatke samog požara kako bi nadoknadili nedostatke samog modela [13].



Slika 7.1. FARSITE model širenja požara

5. MODEL TEMELJEN NA TRANSPORTNIM JEDNADŽBAMA

Kod matematičkog opisivanja modela uzimamo u obzir samo vatreni sloj iznad površine tla. U prethodnim poglavljima smo objasnili kako bi implementacija podzemnog požara u modelu bilo suviše složeno, te bi zahtijevalo previše računanja i računalne memorije, bez pretjeranih poboljšanja u smislu točnosti simulacije. Sljedeći sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi definiran je pomoću ZOE (jednadžbi zakona očuvanja energije).

$$\frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + k_w \vec{v} \cdot \nabla T - k_s \nabla Z \cdot \nabla T + A(S e^{-B/(T-T_a)} - C(T - T_a)), \quad (8.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -C_s S e^{-B/(T-T_a)}, \quad T > T_a, \quad (8.2)$$

T – temperatura vatre, K

S – udio nepotrošenog goriva u odnosu na ukupno dostupno gorivo, 1

Z – nadmorska visina točke, m

k – koeficijent termalne difuzije, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

k_w – koeficijent advekcije vjetra, 1

v – brzina vjetra, m/s

k_s – koeficijent advekcije terena, m/s

A – koeficijent porasta temperature pri maksimalnoj brzini sagorijevanja i potpunim dostupnim gorivom, bez utjecaja hlađenja, K/s

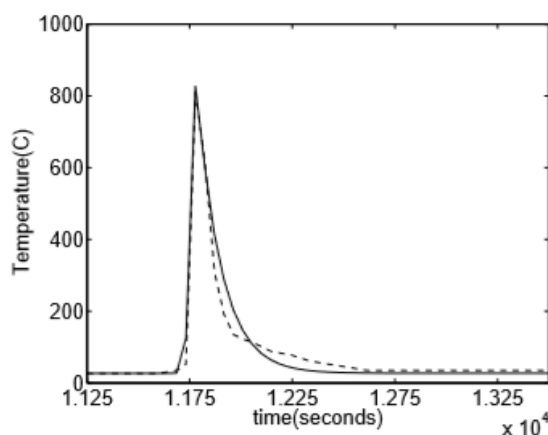
B – koeficijent proporcionalnosti u modificiranom Arrheniusovom zakonu, K

T_a – temperatura okoline, K

C – koeficijent konvekcije prema okolini, K^{-1}

C_s – brzina relativne potrošnje goriva, s^{-1}

Položaj požara u vremenu je prikazan područjem povišene temperature. Val izgaranja se kreće u obliku prstena koji se širi, te mijenja oblik ovisno na konfiguraciju površine, djelovanja vjetra i količine goriva. Do najveće temperature dolazi neposredno uz rub vatrene fronte



Slika 8.1. Temperaturni maksimum na vrhu prstena vatrene fronte sa jedne od simulacija (Izvor: [11])

Neposredno ispred ruba vatrene fronte nalazi se pred zagrijano područje, te nakon izgaranja u prstenu ostaje trag izgorenog goriva gdje se temperatura postepeno smanjuje. Područje izgaranje je modelirano uz pomoć mehanizma prijenosa topline difuzijom, konvekcijom i stvaranje topline kemijskom reakcijom pa se te jednačbe nazivaju reakcijsko-konveksijsko-difuzijske jednačbe.

Na lijevoj strani jednačbe (8.1) nalazimo tranzijentni član $\frac{dT}{dt}$. Na desnoj strani znaka jednakosti nalaze se ostali članovi koji matematički opisuju ponašanje požara. Na prvom mjestu je difuzijski član $\nabla \cdot (k\nabla T)$ koji opisuje difuzivno širenje požara prijenosom topline zračenjem, sljedeći član $k_w \vec{v} \cdot \nabla T$ je advektivni član koji opisuje advektivno širenje vjetrom, a $k_s \nabla Z \cdot \nabla T$ modelira utjecaj reljefa na širenje konvekcijom, opisuje utjecaj terena kao advekciju topline. Konvektivni gubitak topline u okolinu opisuje član $AC(T - T_a)$, a član $AS e^{-B/(T-T_a)}$ definira brzinu kojom se gorivo troši.

U jednačbi koja opisuje svojstva goriva (8.2) član $e^{-B/(T-T_a)}$ predstavlja brzinu kemijske reakcije izgaranja koja dolazi iz pojednostavljene Arrheniusove jednačbe (izraza koji definira brzinu odvijanja kemijske reakcije s obzirom na temperaturu)

$$r(T) = \begin{cases} e^{-B/(T-T_a)}, & T > T_a \\ 0, & T \leq T_a \end{cases}, (8.3)$$

U jednađbama (8.1) i (8.2) koeficijenti A , B i C predstavljaju parametre o kojima ovisi hoće li nastupiti izgaranje goriva. Ovi koeficijenti se određuju promatrajući reakcije pojednostavljenog modela koji treba rezultirati samoodržavajućim i stabilnim širenjem plamenog vala. Pretpostavimo zamišljeni slučaj gdje je temperatura prostora konstanta i iznosi T , a gorivo je stalno prisutno i iznosi $S = 1$. U tom slučaju dobije se sljedeća jednađba:

$$\frac{dT}{dt} = A(e^{-B/(T-T_a)} - C(T - T_a)), \quad (8.4)$$

Rješenja navedene jednađbe su vrijednosti temperature koje predstavljaju točke u kojima je toplina generirana reakcijom izgaranja jednaka toplini koja se gubi u okolinu:

$$f(T) = e^{-B/(T-T_a)} - C(T - T_a) = 0, \quad (8.5)$$

Jednađbom (8.5) dobiju se tri rješenja: najmanju vrijednost, srednju vrijednost i najveću vrijednost temperature (T_p , T_i i T_c). Temperatura stabilne ravnoteže tj. nisko-temperaturni režim (T_p) je vrijednost ispod koje toplina generirana izgaranjem dominira i temperatura raste, a ako je temperatura veća od T_p onda dominira hlađenje pa temperatura pada. Točka labilne ravnoteže ili T_i predstavlja iznos temperature ispod koje dominira hlađenje i temperatura još više pada, a u suprotnom raste. Maksimalna temperatura stabilnog izgaranja T_c predstavlja visoko-temperaturni režim.

Pomoću točaka T_i i T_c mogu se dobiti koeficijenti B i C ako vrijedi uvjet $T_0 \leq T_a < T_i < T_c$. U tom slučaju koeficijenti B i C iznose:

$$B = \frac{\ln\left(\frac{T_i - T_a}{T_c - T_a}\right)}{\frac{1}{T_c - T_0} - \frac{1}{T_i - T_0}}, \quad (8.6)$$

$$C = \frac{e^{-B/(T_i - T_a)}}{T_i - T_a}, \quad (8.7)$$

Kako bi odredili vrijednost koeficijenta A , promatramo slučaj smanjenja temperature površine tla nakon prolaska vala izgaranja. Nakon izgaranja goriva temperatura se smanjuje približno na nulu, a temperatura tla počinje opadati te se promjena temperature može opisati jednađbom:

$$\frac{dT}{dt} = -AC(T - T_a), (8.7)$$

Konačno slijedi:

$$T(t) = T_a + (T(t_0) - T_a) * e^{-AC(t-t_0)}, (8.8)$$

Kao karakteristično vrijeme hlađenja t_c definira se vrijeme potrebno za hlađenje tla za određeni faktor $1/e$, te je:

$$T(t_0 + t_c) - T_a = \frac{1}{e}(T(t_0) - T_a), (8.9)$$

Nakon rješavanja jednadžbe konačno se dobije koeficijent A:

$$A = \frac{1}{Ct_c}, (8.10)$$

Matematički model koji je opisan u ovom radu izravno je povezan modelom iz [14].

Dobivenim koeficijentima može se započeti podešavanje kako bi požar i njegova svojstva bili što realističniji.

6. MODELIRANJE POŽARA NA OTOKU PAŠMANU

6.1. Otok Pašman

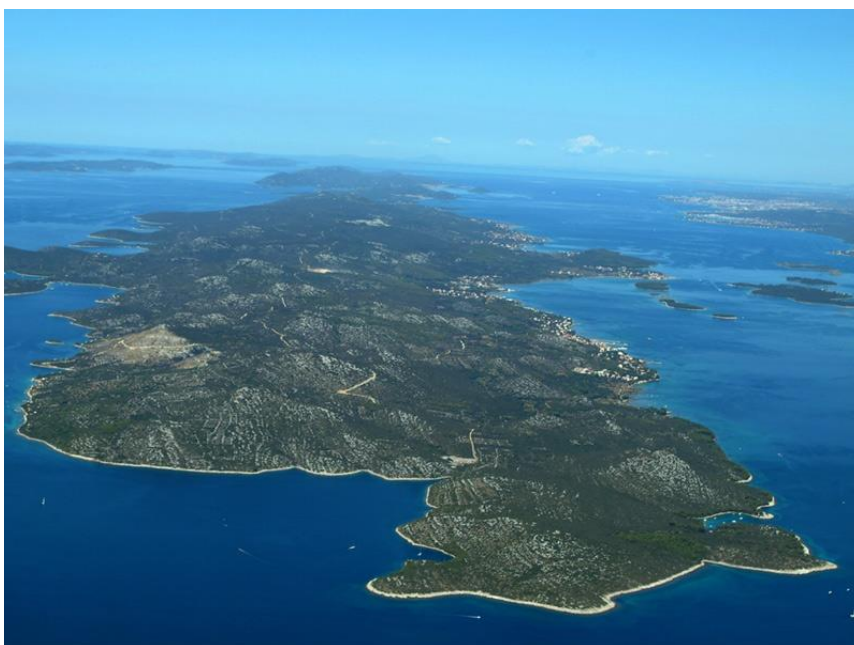
Sa svojih 63 km² [3] Pašman je otok odvojen od Zadra i Biograda Pašmanskim kanalom. Nalazi se u Zadarskom arhipelagu i jedan je od brojnih otoka razasutih na tom području. Kao što smo spomenuli u prethodnom poglavlju, temperatura i vegetacija su pogodni za održavanje požara. Šumski požar na otoku Pašmanu bio bi izuzetno destruktivan, uz dodatni utjecaj vjetra, za naseljena mjesta koja se nalaze na tom području. Izuzetno krški reljef na kojem raste izobilje poprilično suhog mediteranskog bilja je pogodan za širenje vatrene fronte koja bi bila težak protivnik za lokalna vatrogasna društva. Međutim požar na takvom području nebi bio dovoljno snažan da pređe na susjedne otoke ni uz uvjete najjače bure.



Slika 5.1. Pašmanski kanal koji dijeli otoke Ugljan i Pašman

6.2. Odabir parametara modela

Na temperaturu, brzinu i način širenja vatrene fronte na nekom području utječe rasprostranjenost goriva tj. vegetacija na tom prostoru. Na otoku Pašmanu uglavnom prevladavaju šume dalmatinskog bora kao i na velikom broju dalmatinskih otoka. Crnogorične šume gore poprilično sporo ali velikom temperaturom, često je takav teren neprohodan pa je takve požare teško ugasiti. Kamenjarski pašnjaci ili krške livade su također čest prizor u ovom dijelu zemlje, a predstavljaju značajan problem kada se radi o gašenju požara. Razlog tome je da na kamenjarskim pašnjacima raste niska suha trava koja brzo izgara ali i brzo prenosi užarenu frontu. Na označenom prostoru obuhvaćen je i dio naselja kojem se nemože pripisati velika sposobnost izgaranja ali zbog nastamba koje su izgrađene od prirodnih zapaljivih materijala (drvo, tkanina...) mora se uzeti u obzir.



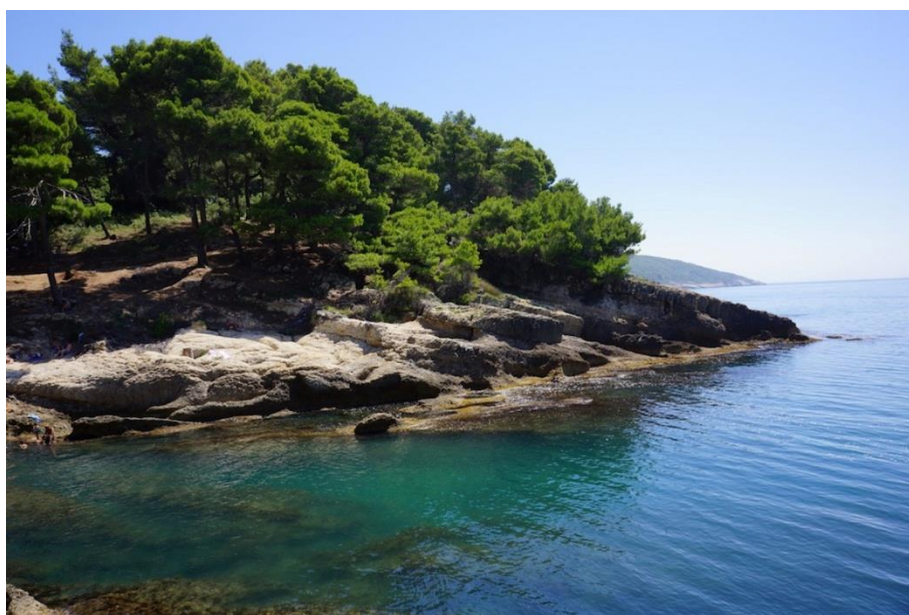
Slika 9.1. Pogled na Pašman sa juga

Također osim krških livada i visokih šuma krajolik popunjava i grmolika vrsta vegetacije koja je također dominantna. Kao i na obližnjim otocima vrlo je rasprostranjen smrijek koji će zbog svoje gustoće ometati širenje fronte ali je vrlo lako zapaljiv.



Slika 9.2 Smrijek i niska grmovita vegetacija

Borove šume koje su najrasprostranjenije na ovim prostorima vrlo su lako zapaljive jer debla alepskog bora izlučuju zapaljivu smolu koja može usmjeriti plamen vrlo velikom brzinom do borove krošnje. Na ovaj način mogu nastati ovršni požari koji se šire opasno velikom brzinom. Navedeno područje u ovom radu sadrži površinu koja pripada borovoj šumi, a zauzima približno 30% domene stoga je bilo potrebno podesiti koeficijente kako bi brzina širenja na tom području bila najrealnija. Na slici je prikazan dio borove šume na otoku Pašmanu.



Slika 9.3. Lako zapaljiva borova šuma

Pretpostavljena brzina širenja požara je 0,001 do 0,05 m/s, dok se temperatura kreće u intervalu od 800 do 1200 °C [6]. Koeficijenti koji ovise o gorivom materijalu su S , k , A i Cs , te su prikazani u sljedećoj Tablici 9.1.

Tablica 9.1. Odabrani parametri

Parametri	Vrijednosti parametara				
	Krški kamenjar	Naselje	Grmolika vegetacija	Visoke borove šume	Ceste
S	0.2-0,4	0-0,2	0,5-0,8	0,8-1,0	0,0
k, m^2s^{-1}	0,04	0,1	0,05	0,1	0,01
A, Ks^{-1}	130	100	165	200	0,0
Cs, s^{-1}	0,17	0,13	0,1525	0,13	0,0

Brzina širenja vatrene fronte osim vegetacije ovisi i o brzini vjetra tj. opskrbe kisikom. Rast brzine vjetra uzrokuje i povećanje količine energije koja se prenosi na okolnu vegetaciju. Sporednu ulogu ima i energija koja odlazi u okolinu, naime ona ne širi izravno požar već suši okolnu vegetaciju koja će na taj način lakše planuti. Posljednji parametar čiju vrijednost treba odrediti je k_w , odnosno koeficijent advekcije vjetra. Spomenuti koeficijent advekcije vjetra određen je na temelju simulacija rađene na ravnom terenu sa vjetrom konstantnog intenziteta i smjera. Sa radova [6][7] preuzeti su podaci o utjecaju vjetra na širenje požara. Iz simulacije moramo izuzeti nastanak ovršnih požara zbog njihove prirode koje je teško oblikovati modelom, stoga parametre održavamo u intervalima kada je nemoguće u realnim situacijama stvaranje ovršnih požara. Pri vjetru od i 15 km/h brzina širenja požara se kreće od 0,5 do 7 km/h ovisno o tipu vegetacije. Konačno dobivene vrijednosti koeficijenta k_w su:

$k_w = 0,125$ za površine sa rijetkom vegetacijom (na otoku Pašmanu su to krške livade) i

$k_w = 0,035$ za površine sa gustom vegetacijom (borova šuma...)

Konstitucija terena značajno utječe na brzinu i način širenja požara. Uzbrdo se vatrena fronta lakše širi zbog manje gustoće toplog ili vrućeg zraka koji suši i grije vegetaciju ispred sebe, stoga se požar i puno teže širu nizbrdo. Na realnim eksperimentima [15] se pokazalo da se rastom nagiba od 11° na kosini od 22° brzina širenja vatrene fronte udvostručuje.

U modelu je korišten koeficijent advektivnosti $k_s = 0,16$. Parametri B i C se dobivaju iskustveno metodom pokušaja i pogreške dok se ne dobiju najrealističniji rezultati:

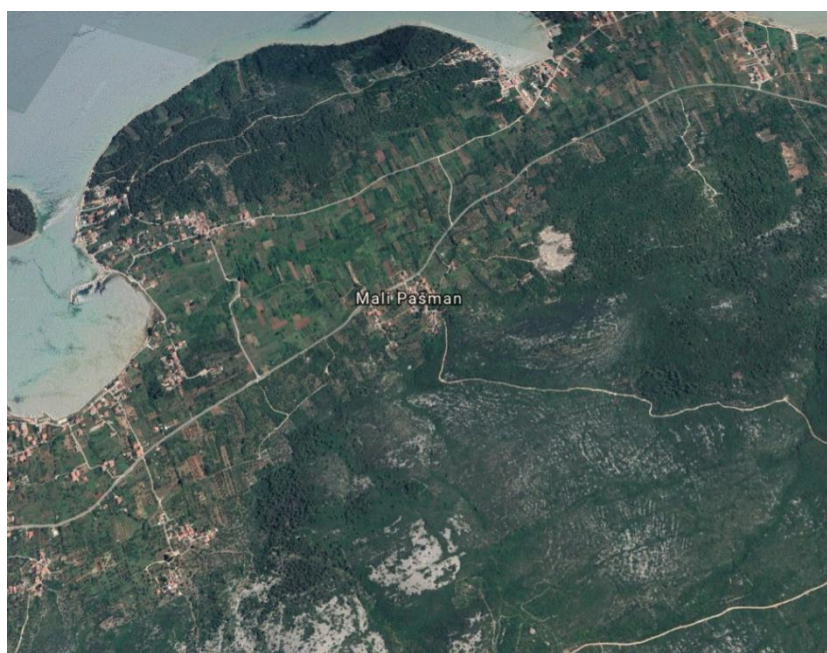
$$B = 575 \text{ K}$$

$$C = 0,000018 \text{ K}^{-1}$$

7. REZULTATU SIMULACIJA ŠIRENJA POŽARA

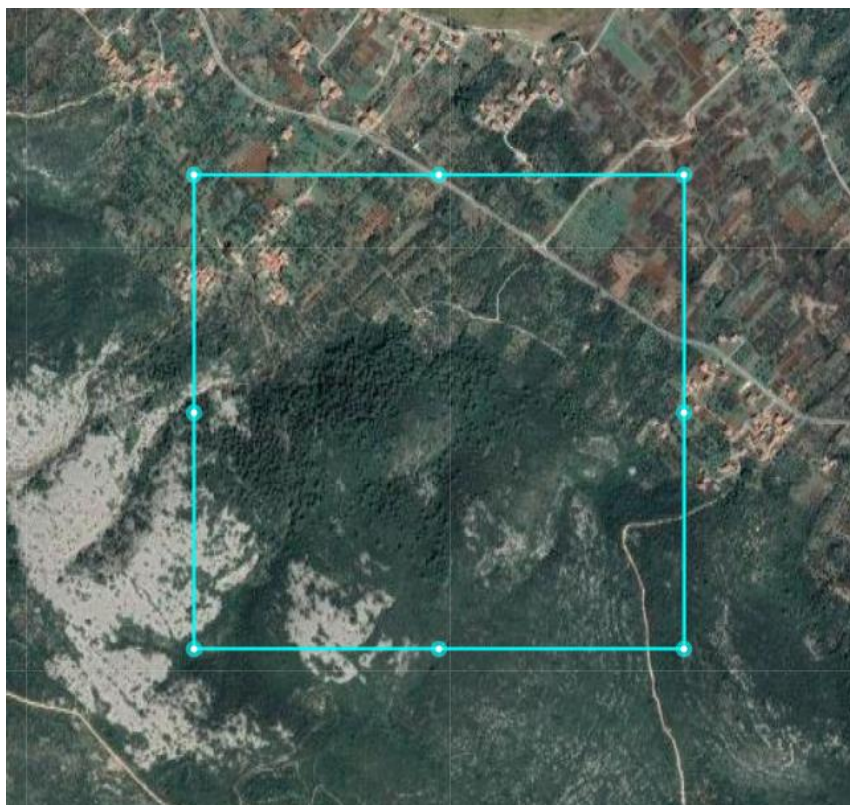
7.1. Vizualizacija računalnih simulacija

Simulacija je rađena na području naselja Mali Pašman. Ovo područje je odabrano iz razloga kako bi se najbolje prikazao odnos vegetacije i nagiba terena. Najbolje je mjesto za razvitak požara iz razloga jer se gusta vegetacija sklona požarima nalazi na nagibu. Stoga se mogu očekivati zanimljivi rezultati uz realistično ponašanje vatrene fronte.



Slika 10.1. Pogled na konstituciju područja Malog Pašmana

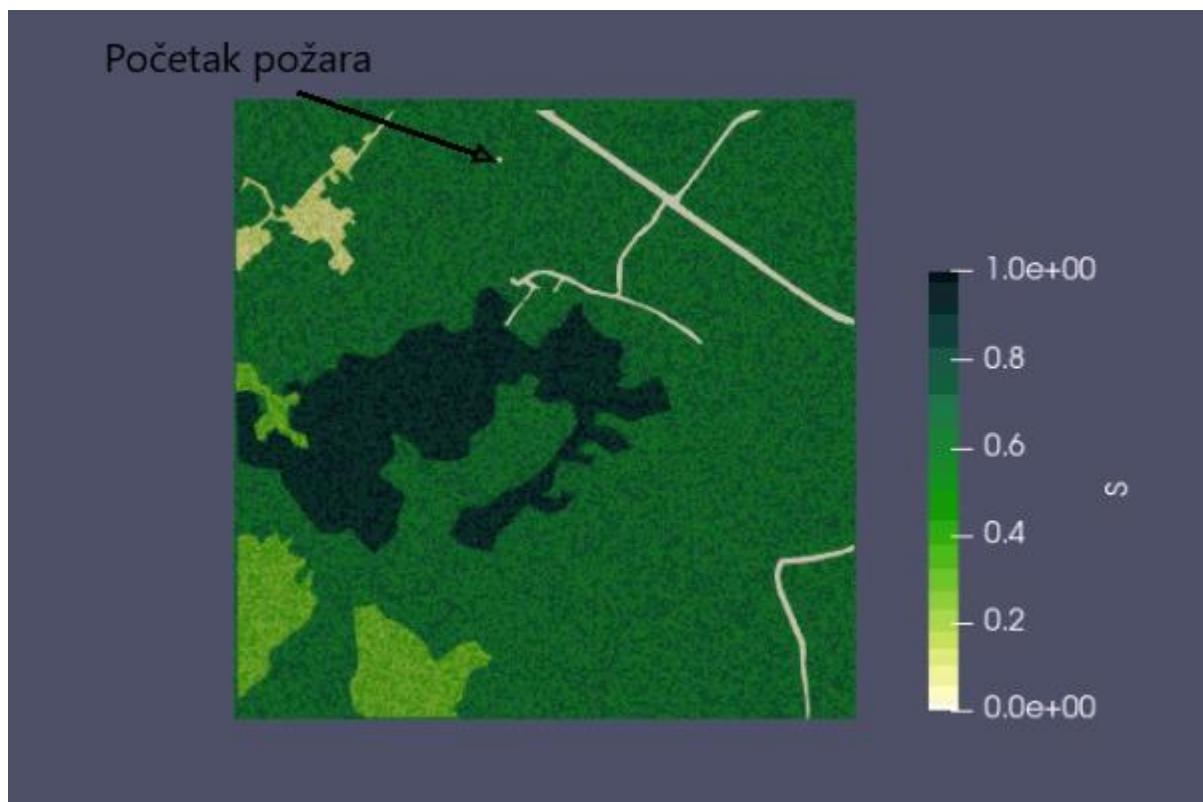
Određena domena je veličine $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, koja se razvija u mrežu koja sadrži 1000×1000 točaka. Početne vrijednosti kao što su temperatura tla i okoline iznose 293 K , odnosno 20 °C . Takve vrijednosti su uzete iz razloga jer su one osnovne referentne vrijednosti, odnosno prosječna temperatura na ovom podneblju.



Slika 10.2. Odabrana domena na kojoj se odvija simulacija

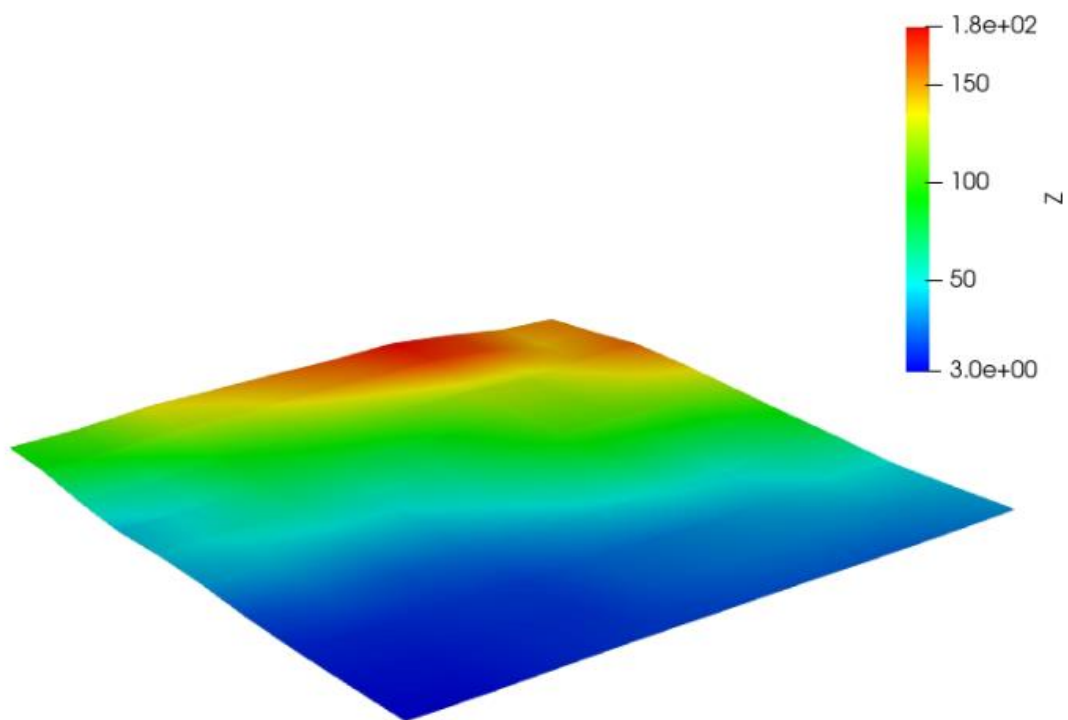
U gornjem lijevom kutu nalazimo ogranak naselja Mrljane, u južnom pravcu nalazi se šuma alepskog bora koja se penje uz nagib koji završava u donjem lijevom kutu. S druge strane na gornjem desnom kutu nalazimo dio glavne ceste koja se pruža kroz cijeli otok. Na donjem desnom kutu kao i na većem dijelu domene nalazimo grmoliko bilje koje uglavnom zauzima oko 60% cjelokupne površine na odabranoj domeni.

Požar započinje na gornjem dijelu domene uz samo naselje, tj. u podnožju nagiba. Takvo je mjesto najpogodnije za turiste ili stanovnike koji često pripremaju hranu na otvorenom. Velika je šansa da će požar započeti upravo na takvom mjestu.



Slika 10.3. Početak požara i raspodjela gorivog materijala

Na slici 10.3. prikazana je raspodjela gorivog materijala na području domene. Tamno zelena boja označava područje sa gušćom vegetacijom tj. područje borove šume, a najsvjetlije područja označavaju krške livade sa malom količinom goriva. Bijelom i blijedom zelenom bojom prikazana je cesta i naselje. Nadmorske visine se ne kreću iznad 180, niti ispod 30 metara nadmorske visine kao što je prikazano na sljedećoj slici:

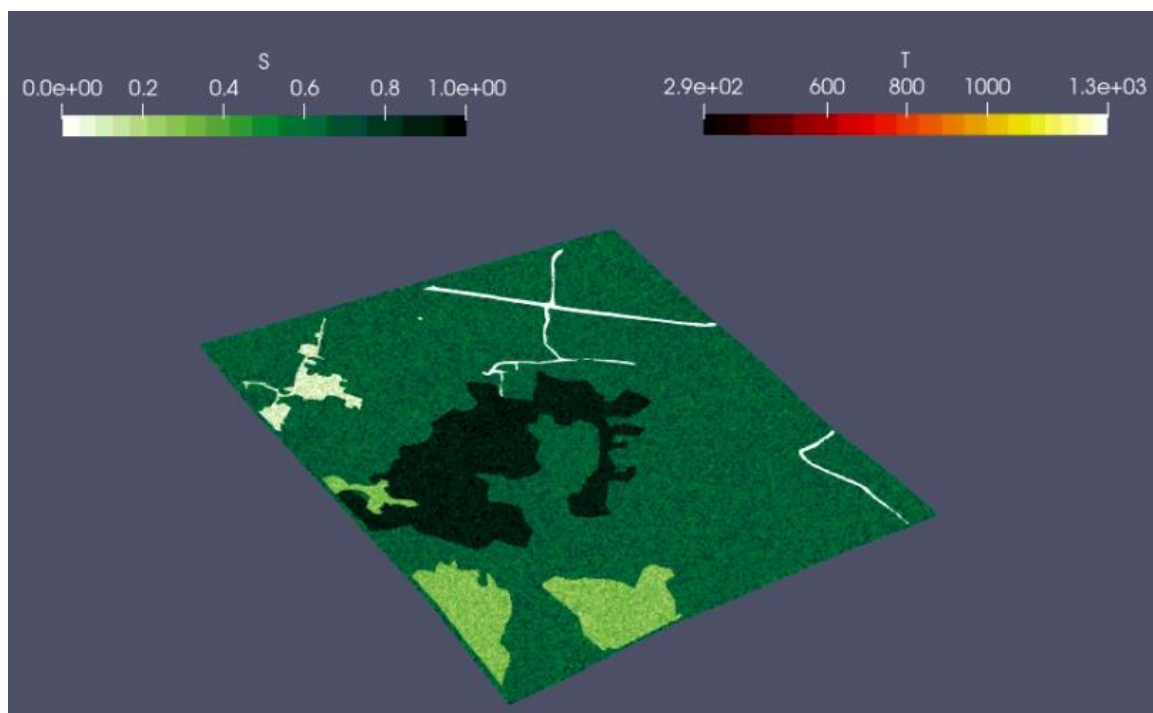


Slika 10.4. Konfiguracija reljefa odabranog područja

U ovom dijelu rada prikazat ćemo širenje vatrene fronte na odabranom terenu bez i sa utjecajem vjetra na požar. Potrebno je prikazati oba slučaja jer za vrijeme ljetnih mjeseci vrlo se često može dogoditi da za vrijeme požara ne bude vjetra. Iz tog razloga treba prikazati simulaciju u kojoj nema utjecaja vjetra kako bi se odredila strategija gašenja. S druge strane dani kad je vjetar značajan nisu rijetki stoga treba imati plan gašenja i u tom slučaju. Na području otoka Pašmana vrlo je česta bura koja je vjetar koji puše sa kopna. Ona je hladan, suh i mahovit vjetar koji može povećati brzinu širenja požara te potaknuti njegovo nasumično širenje pojavom „spottinga“, gdje vjetar raznosi zapaljene čestice te pali nova područja. U ovoj simulaciji se taj efekt neće prikazati zbog svoje nepredvidive naravi, ali se jako precizno može prikazati utjecaj vjetra.

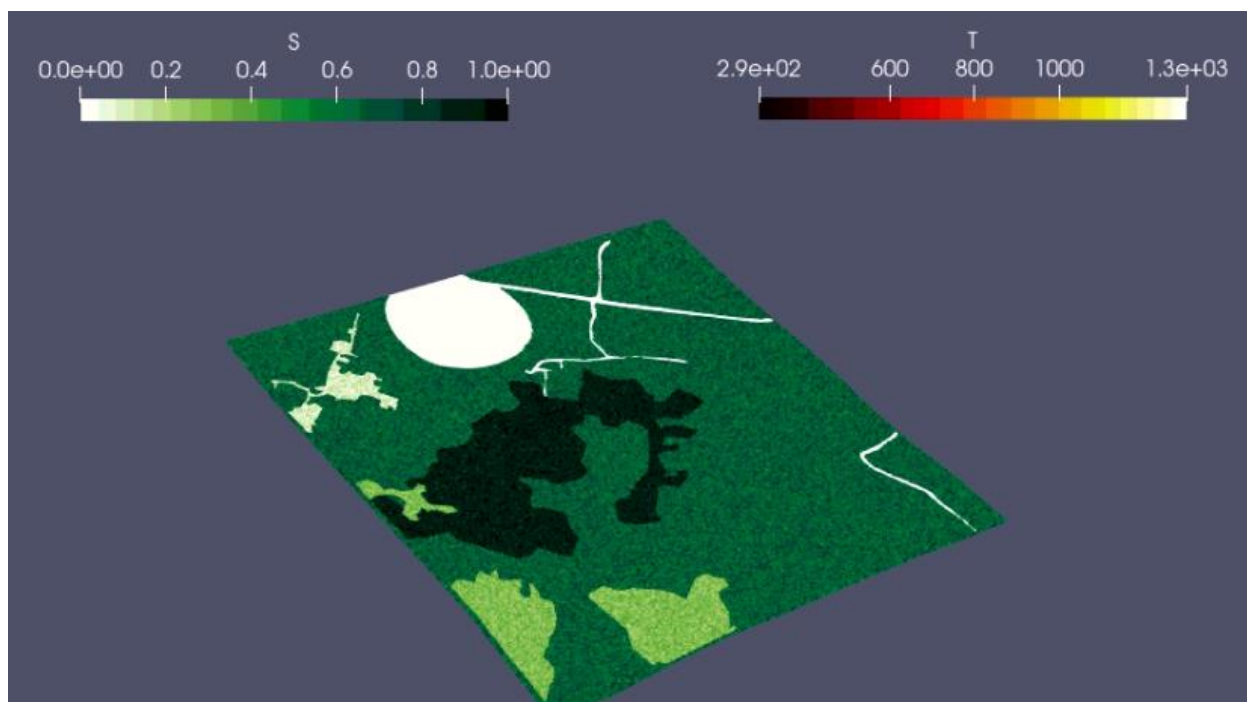
7.2. Širenje požara bez utjecaja vjetra

U slijedećem dijelu rada prikazano je odvijanje požara koji započinje sa označenog mjesta, simulacija je provedena bez utjecaja vjetra kako bi se precizno prikazalo napredovanje vatrene fronte. Uz slike ponuđene su i legende koje označavaju temperaturu i gustoću vegetacije.



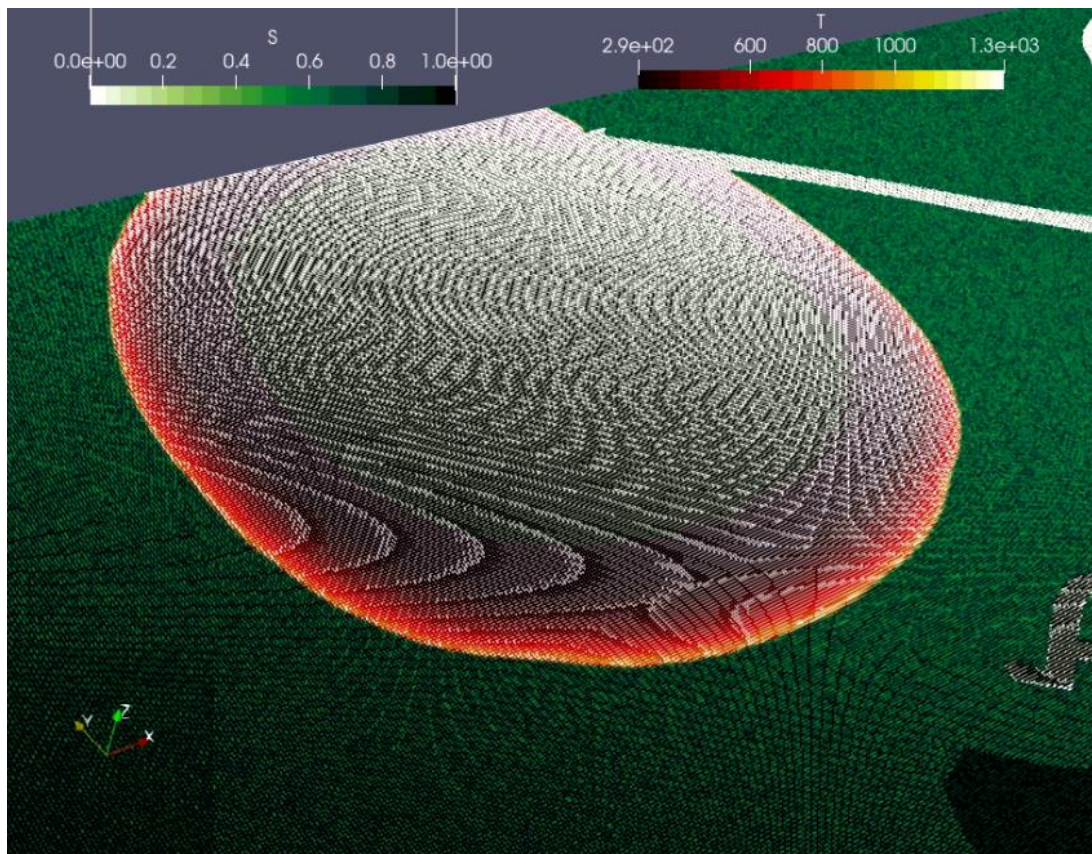
Slika 11.1.1. Požar u trenutku zapaljenja

Temperature vatrene fronte mogu dosegnuti vrijednosti od 2900 K, odnosno 2630 °C ovisno o količini goriva i nagibu. U slučaju bez utjecaja vjetra širenje požara po površini konstantne gustoće vegetacije se odvija ravnomjerno u svim smjerovima za razliku od slučaja kada je prisutan vjetar. Također treba obratiti pažnju na mjesta gdje požar prelazi na površine različite raspodjele goriva. Na sljedećoj slici vidimo napredovanje vatrene fronte 100 minuta nakon zapaljenja.

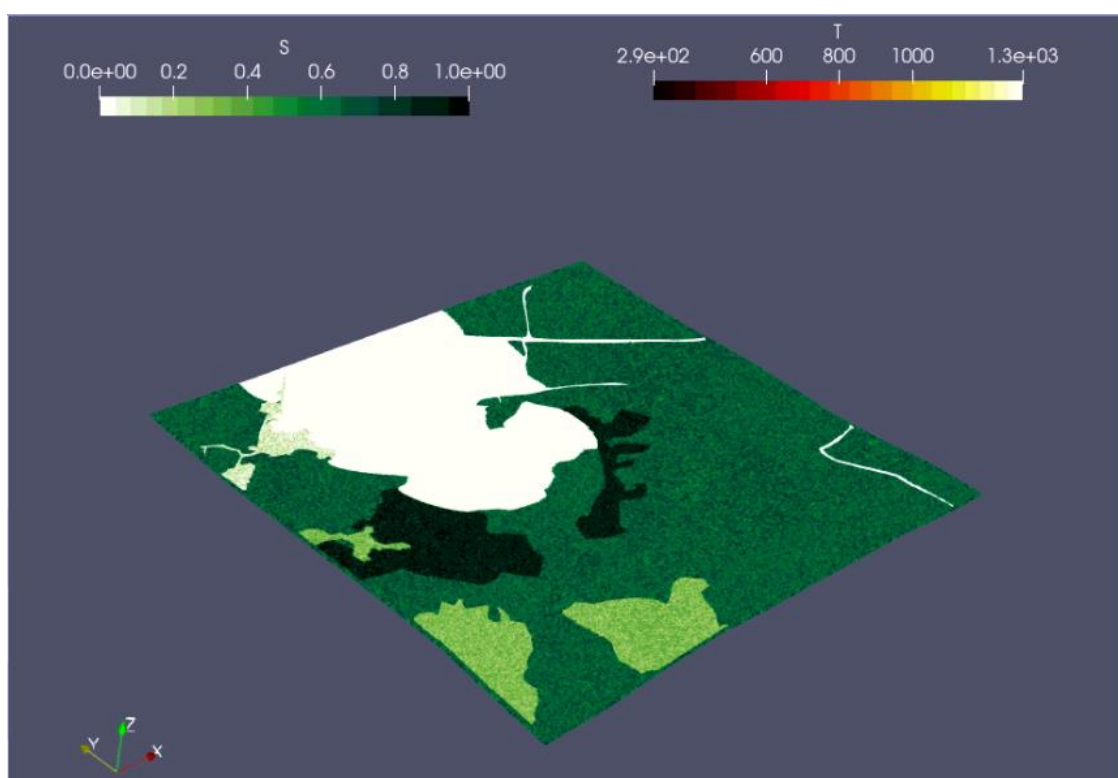


Slika 11.1.2. Obuhvaćeno područje 100 minuta nakon zapaljenja

Već 100 minuta nakon pokretanja simulacije opažamo da se vatrena fronta širi ravnomjerno u svim stranama osim na strani gdje se nalazi cesta. Cesta predstavlja područje bez prisustva goriva stoga se unatoč bijele boje neće zapaliti, te će se požar širiti uz njen rub. Na sljedećoj slici koja prikazuje raspodjelu temperature na vatrenoj fronti možemo raspoznati prsten visoke temperature koji smo prikazali na slici 8.1.

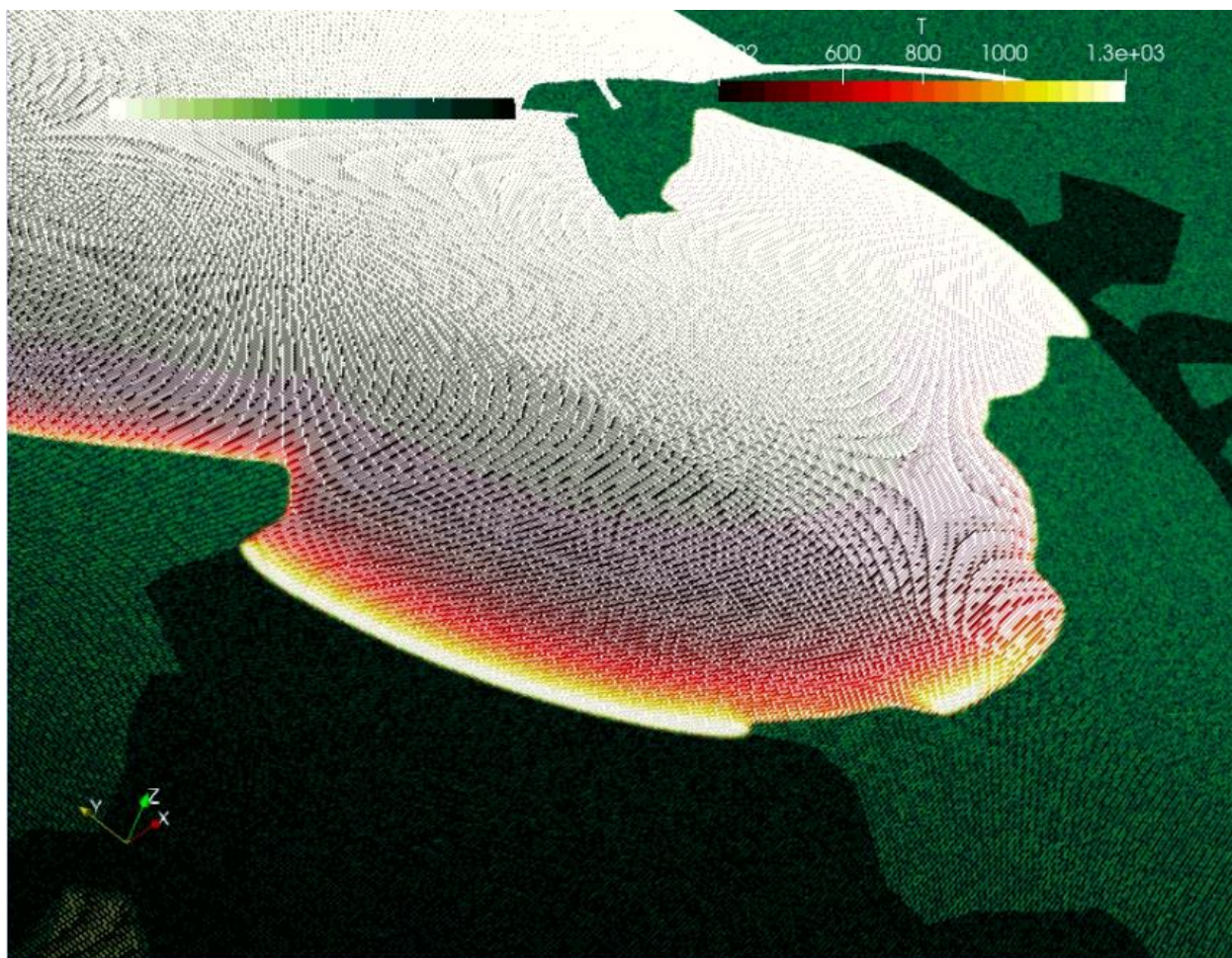


Slika 11.1.3. Prikaz raspodjele temperature vatrene fronte



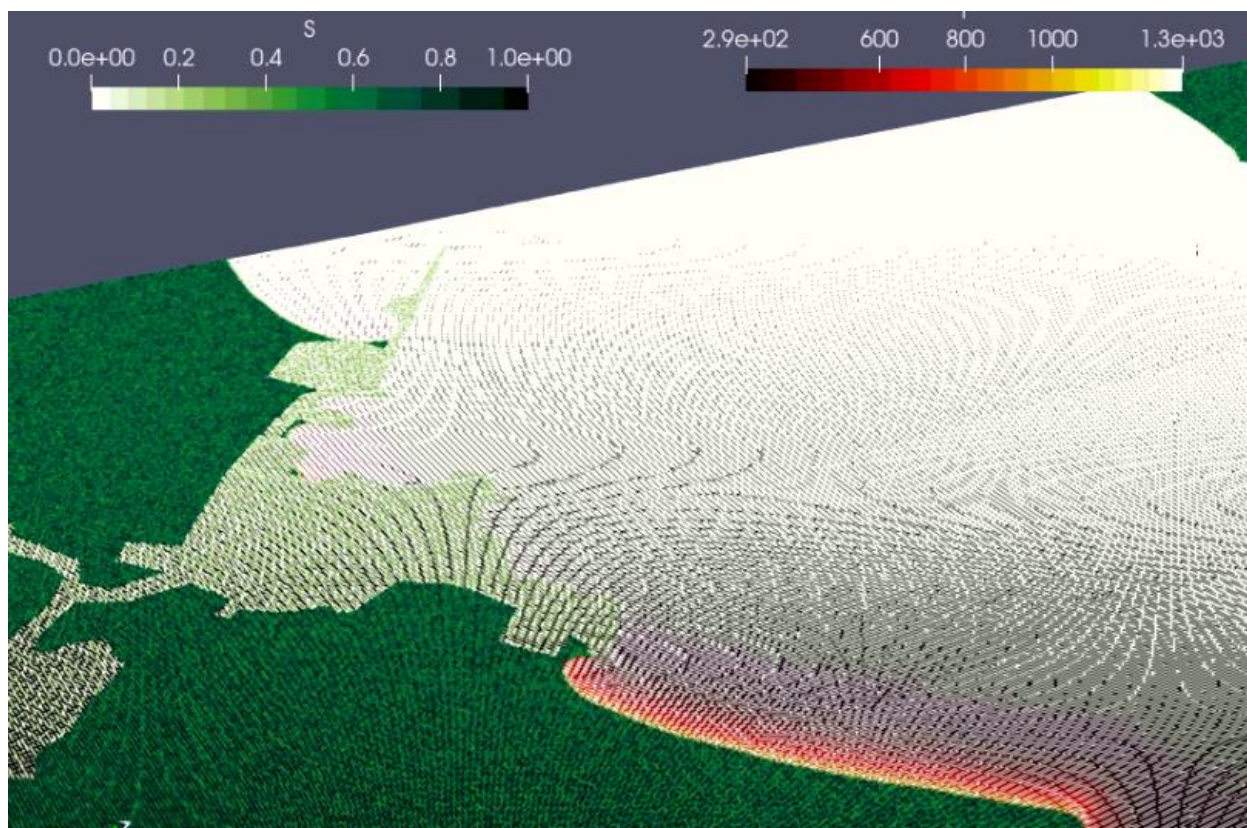
Slika 11.1.4. Obuhvaćeno područje 200 minuta nakon zapaljenja

Nakon 200 minuta možemo vidjeti da se požar počeo probijati kroz gustu vegetaciju koja je označena najtamnijom zelenom bojom. Na tom području požar se širi poprilično brzo jer dolazi u područje gušće vegetacije dok se u isto vrijeme nalazi na uzbrdici.



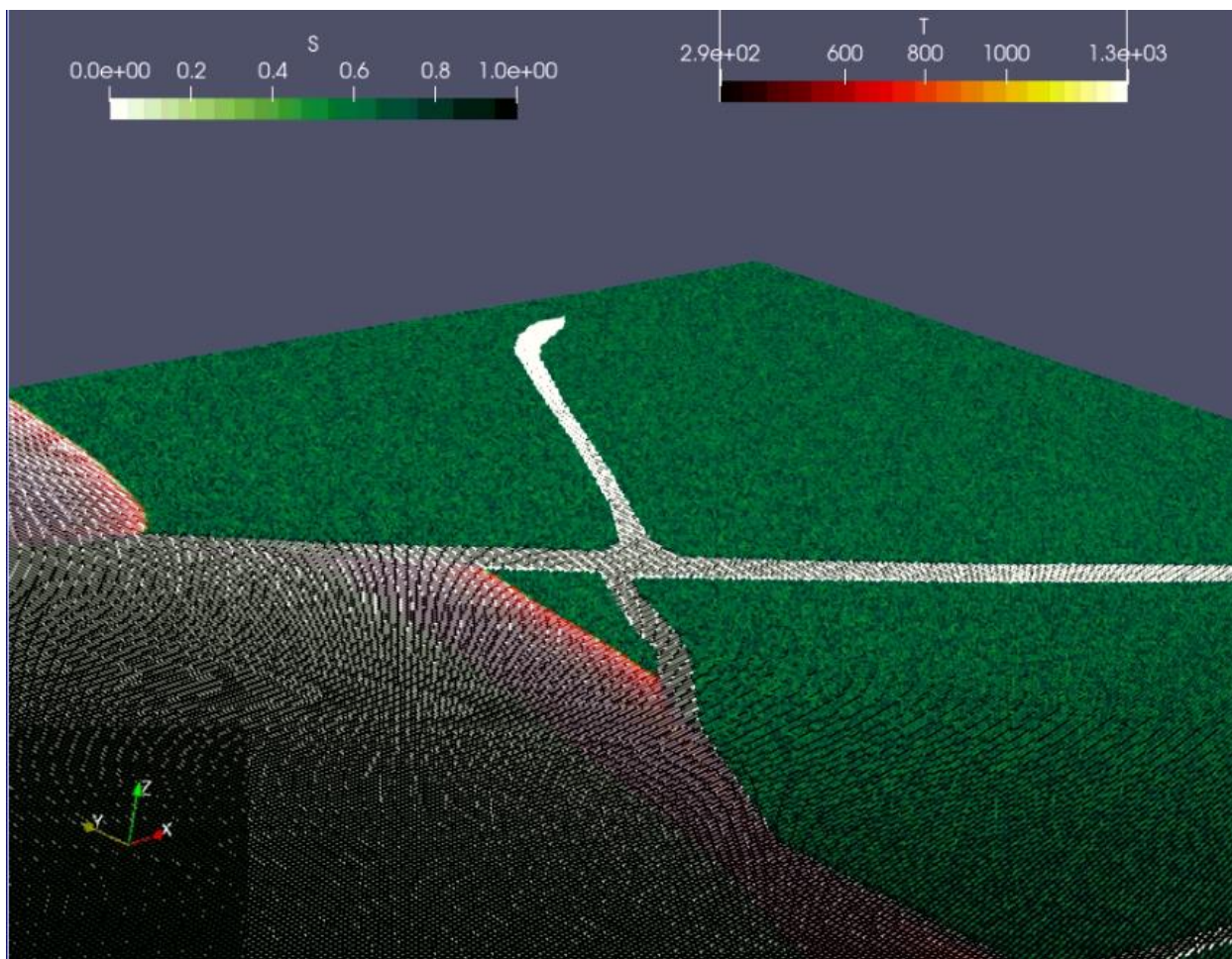
Slika 11.1.5. Požar prelazi u područje veće količine goriva

U ovom trenutku požar doseže temperature i brzine koje se približavaju maksimalnim vrijednostima. Temperatura vatrene fronte prelazi 2000 °C, a brzina neprestano raste. Požar dolazi u kontakt sa naseljenim mjestom koji ima nisku gustoću gorivog materijala te se kroz njega probija poprilično teško, te će ga u narednim trenucima jednostavno zaobići.



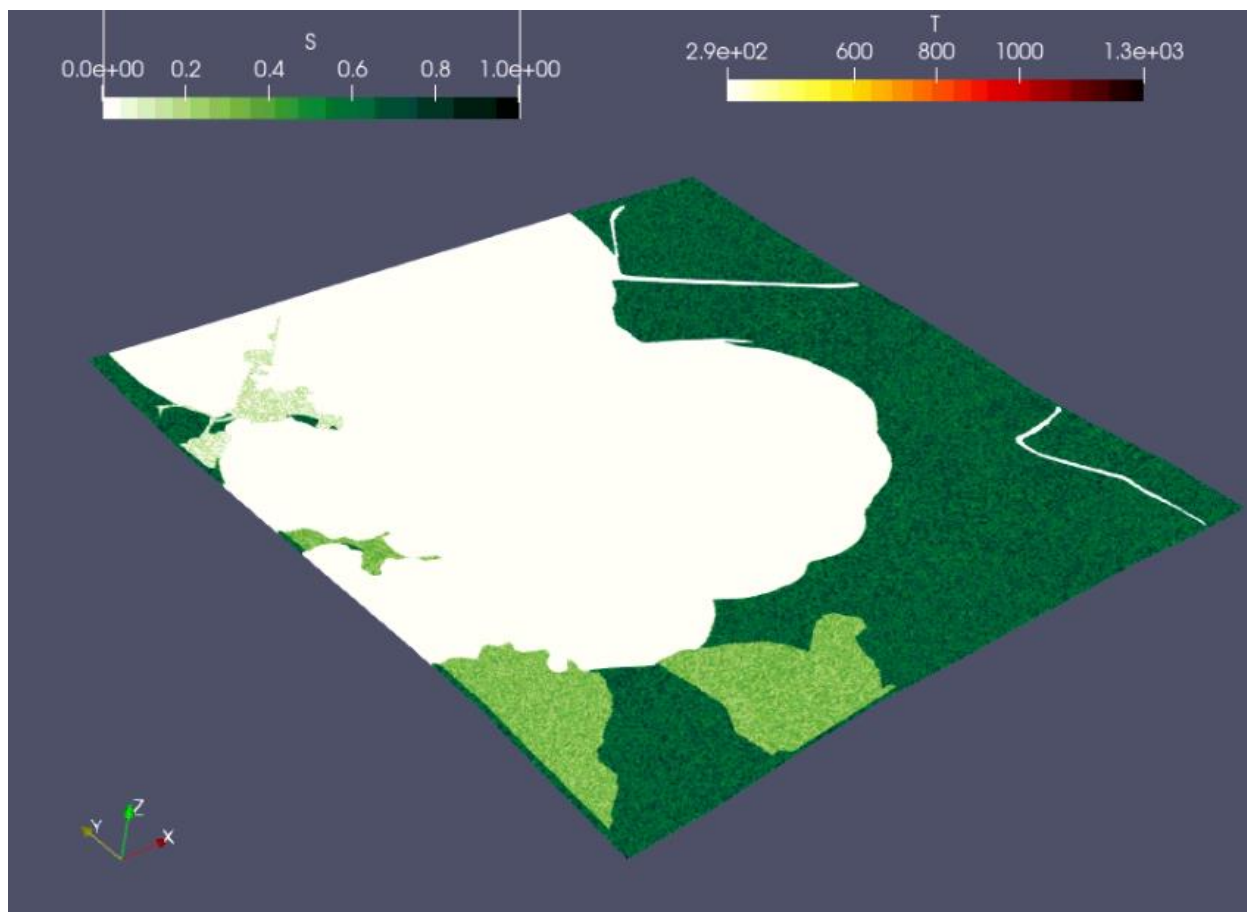
Slika 11.1.5. Požar zaobilazi naseljeno mjesto

Zbog nemogućnosti prelaženja ceste koja požaru predstavlja veliku prepreku, požar je prisiljen pratiti njen tok. Cesta u ovom slučaju igra ulogu barijere koja onemogućava daljnje širenje požara u smjeru x koordinate. S druge strane prilikom susreta požara sa rubom domene ponašanje požara je podložno grešci. Rezultati dobiveni na rubovima domene se ne mogu smatrati ispravnima i vjerodostojnima.



Slika 11.1.6. Požar prati tok ceste

U sljedećim trenutcima požar se umjerenom brzinom širi prema najvišoj točki domene koja se nalazi u donjem lijevom kutu domene, zadržavajući temperaturu od $1500[^\circ\text{C}]$. Nakon 300 minuta područje zahvaćeno požarom se znatno proširilo te obuhvaća više od 60% od ukupne domene.

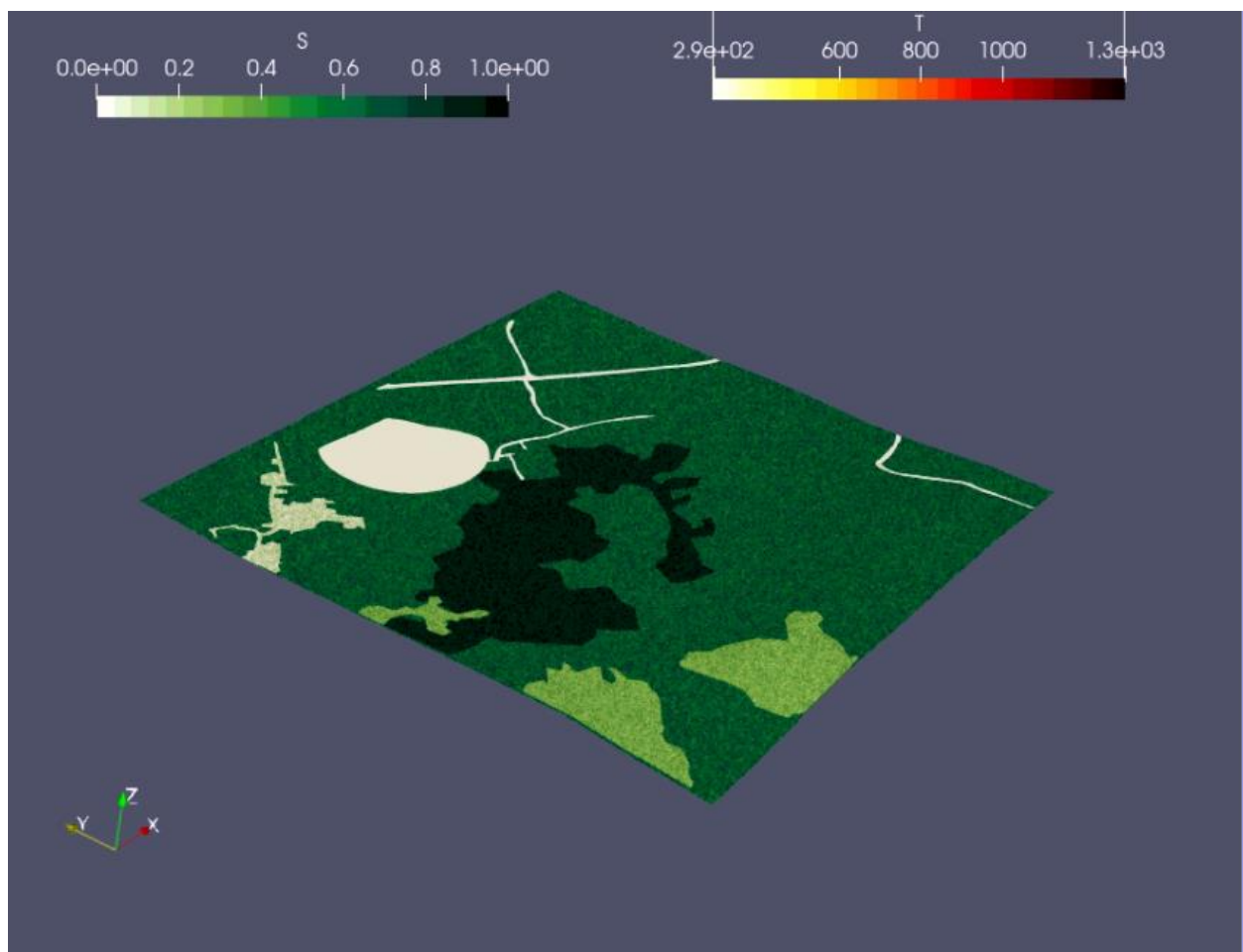


Slika 11.1.7. Užareno područje nakon 300 minuta

Naposljetku kada bi se simulacija mogla odvijati u beskonačnom vremenu raspodjela goriva iznosila bi 0 na 99.9 % površine domene.

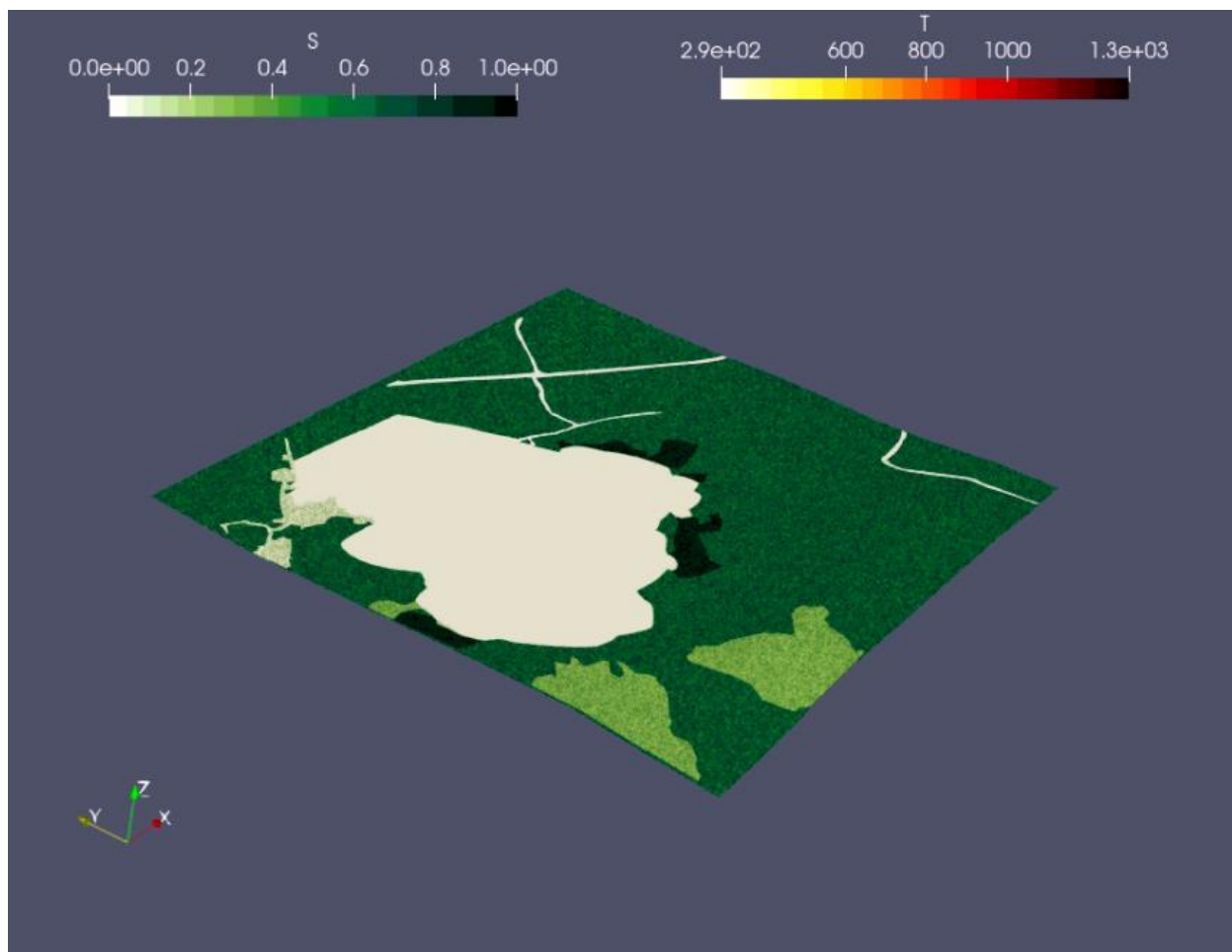
7.3. Širenje požara uz utjecaj vjetra

U slijedećoj simulaciji pomoću parametra k_{wind} dodaje se vektorski utjecaj vjetra u jednom smjeru. S obzirom da vjetar nema jednaku snagu na šumskom području i na području ceste gdje nema prepreke koja bi usporavala vjetar, potrebno je za različita područja postaviti različiti intenzitet vjetra. Stoga na području borove šume parametar k_{wind} iznosi 0,025, na području grmolike vegetacije je nešto jači te iznosi 0,5, a u naseljenom mjestu, cesti i krškom kamenjaru ima vrijednost 1. Brzina vjetra iznosi 2,7 m/s.



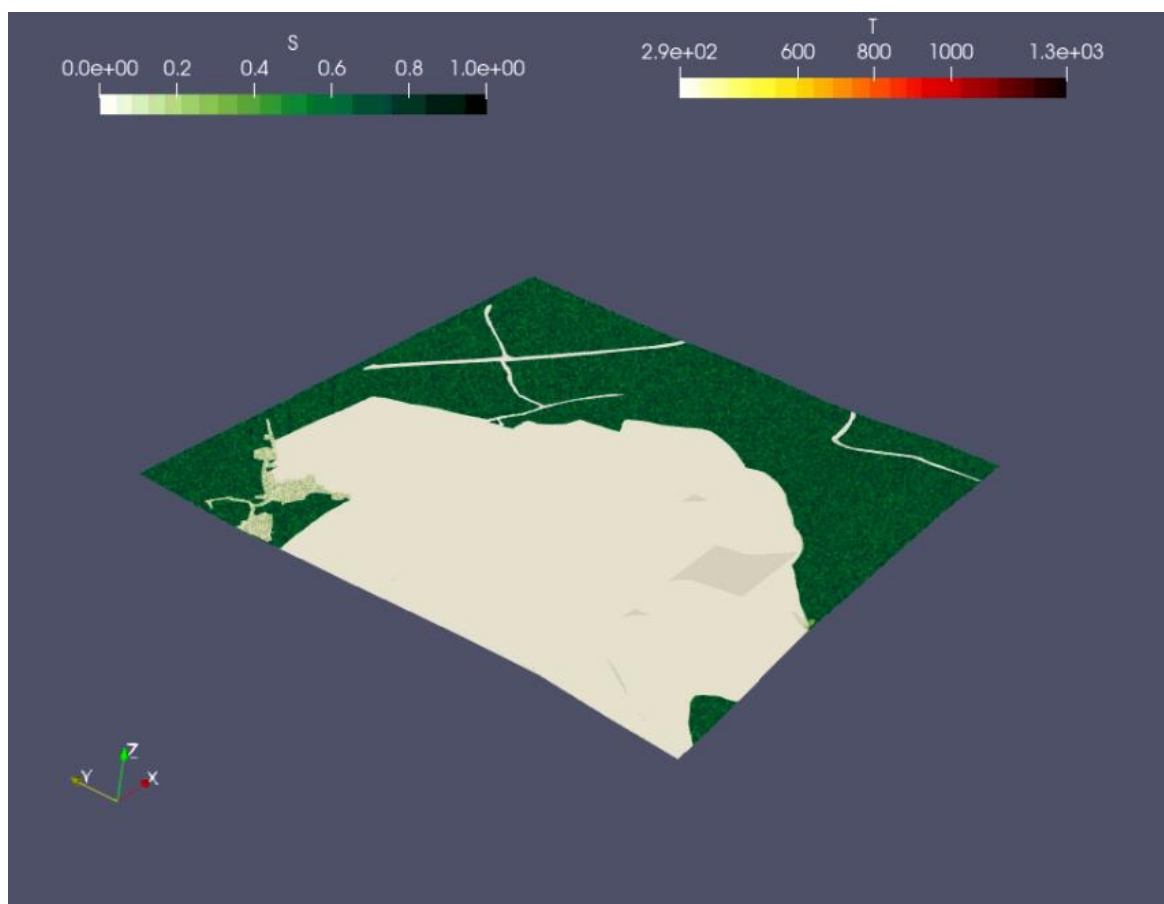
Slika 11.2.1. Izgoreno područje nakon 83 minute

Već nakon 83 minute može se uočiti značajna razlika u odnosu na simulaciju bez utjecaja vjetra. S obzirom da je konfiguracija terena u ovom slučaju vrlo jednostavna, požaru se može širiti bez značajnih poteškoća u smjeru vjetra.



Slika 11.2.2. Opožareno područje nakon 160 minuta od zapaljenja

Vatrena fronta nakon 160 minuta prelazi u borovu šumu koja povećava njenu temperaturu na visokih 2800 Kali zbog svoje velike gustoće usporava širenje vatrene fronte. Kao što je već spomenuto požar na područjima velike gustoće gorivog materijala sporije se širi, te zahtijeva više vremena kako bi napredovao. Uz pomoć vjetra gusta borova šuma ne predstavlja više značajan problem te se požar lako i brzo širi kroz veliku gustoću gorivog materijala. Na slijedećoj slici 11.2.3. možemo vidjeti da se izgorjena površina povećala za 80 % od površine u 160 minuti što označava da požar lako prelazi i kroz krški kamenjar.



Slika 11.2.3. Opožarena površina nakon 240 minuta

Na slikama 11.2.1., 11.2.2., 11.2.3., 11.2.4. vidimo da se požar zbog konfiguracije terena i početne točke zapaljenja vrlo lako širi do najviše točke domene koja se nalazi na donjem lijevom kutu. Uz pomoć vjetra, koji ima svoje djelovanje djelomično prema smjeru najviše točke, požar vrlo lako prelazi prepreke kao što su gusta borova šuma i krški kamenjar sa malom gustoćom goriva. S druge strane s obzirom na visoke temperature i brzinom širenja vatrena fronta ne može savladati naselje sa vrlo rijetkom raspodjelom gorivog materijala i značajno malim utjecajem vjetra (niski parametar k_{wind}). Površina koja je izgorena na kraju simulacije sa vjetrom iznosi oko 600.000 m². Pretpostavka da će požar pratiti umjereni vjetar na području Dalmacije poprilično je realna stoga možemo zaključiti da je situacija koja je opisana u posljednjem potpoglavlju realna.

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio napraviti računalnu simulaciju širenja šumskog požara na području otoka Pašmana. Odabrano je područje zbog svoje specifične konfiguracije terena i položaja naseljenog mjesta. Poznavajući fizikalna svojstva i mehanizme širenja realnih požara u prirodi, napravljen je matematički model širenja šumskog požara. U obzi se uzimaju i faktori koji utječu na širenje vatrene fronte kao što su utjecaj vjetra i gustoća zapaljive vegetacije tj. goriva. Pomoću programa OpenFOAM 5.0 rješavan je model konačnih volumena od kojeg su se očekivali najrealističniji rezultati. Nakon definiranja osnovnih numeričkih parametara kao što su gustoća domene s obzirom na broj točaka mreže, vrijeme trajanja simulacije i broj potrebnih kalkulacija, napravljene su dvije simulacije šumskih požara: prva simulacija opisuje šire bez utjecaja vjetra, a druga uključuje vjetar kako bi se ostvarili rezultati usporedivi sa realnim slučajem.

Dobiveni rezultati u simulacijama su zadovoljavajući jer pružaju dokaz da osmišljeni model ima temelje u fizikalnim zakonitostima i daje prihvatljiva rješenja. Zamijećeni su faktori koji utječu na povećanje temperature vatrene fronte kao što su rasprostranjenost gorivog materijala ili vegetacije i utjecaj različitih vrsta vegetacije. S druge strane nagib terena i utjecaj vjetra povećavaju brzinu širenja simuliranog požara te tako omogućavaju njegovo brže širenje. Pojave kao što su prelazak požara preko ceste i širenje požara nizbrdo zamijećene su samo u simulacijama u kojima je uveden parametar k_{wind} koji određuje intenzitet vektorskog utjecaja vjetra. Navedena ponašanja su u skladu sa realnim karakteristikama požara, stoga se može zaključiti da je model ispravan i da je utemeljen na realnom ponašanju požara u prirodi.

Model ne uzima u obzir neke bitne faktore i određena ponašanja požara pod utjecajem vjetra, stoga mjesta za poboljšanje ima. Od velike je važnosti da budući modeli integriraju pojave kao što su međudjelovanje požara i atmosfere, utjecaj reljefa na jačinu vjetra (u ovom radu opisan je utjecaj gustoće goriva na intenzitet vjetra) i pojave kao što je „firespotting“ (točkasto širenje požara). U ovom modelu pojednostavljeno je modeliranje goriva što se odnosi na udio vlage u gorivu (rosa, kapljice vode itd.), te različite vrste vegetacije u određenim kategorijama gorivih površina (u šumama sa velikom gustoćom goriva nalaze se debla koja sporije gore i suho lišće koje brže gori).

Iako se ovim poboljšanjima simulacija i model mogu značajno poboljšati, postoji mogućnost da to nije ni potrebno jer bi se na taj način izgubila jednostavnost modela. Povećanjem kompleksnosti modela ta prednost bi se izgubila. Glavni razlog netočnosti modela je manjak

podataka o terenu, vremenskim uvjetima i sastavu, kvaliteti i rasprostranjenosti goriva. Uključivanjem mjerenja parametra požara u realnom vremenu prilikom izvršavanja simulacije model bi se mogao recalibrirati i automatski ažurirati podatke čime bi se postigli točniji rezultati.

9. LITERATURA

- [1] NASA Earth observatory: "Fire", s Interneta,
https://earthobservatory.nasa.gov/globalmaps/MOD14A1_M_FIRE, 12.02.2019.
- [2] Joint Research Centre Technical report: "Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2017", European Commission, 2014.
- [3] Wikipedija "Šumski požari", s interneta,
https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%A0umski_po%C5%BEar, 15.06.2019.
- [4] CROSBİ "Požari u Republici Hrvatskoj: prostorna i vremenska analiza", s interneta
<https://www.bib.irb.hr/527438>
- [5] Rossa, C.G.; Fernandes, P.M.: "Empirical Modeling of Fire Spread Rate in No-Wind and No-Slope Conditions", Society of American Foresters, 2018.
- [6] Cheney, N.P.; Gould, J.S.; Catchpole, W.R.: "Prediction of Fire Spread in Grasslands", International Journal of Wildland Fire, 1998.
- [7] Andrews, P.L.; Cruz, M.G.; Rothermel, R.C.: "Examination of the wind speed limit function in the Rothermel surface fire spread model", International Journal of Wildland Fire, 2013.
- [8] Linn, R.R.; Weise, D.R.; Winterkamp, J.: "A numerical study of slope and fuel structure effects on coupled wildfire behaviour", International Journal of Wildland Fire, 2010.
- [9] Linn, R.R. i dr.: "Coupled influences of topography and wind on wildland fire behaviour", International Journal of Wildland Fire, 2007.
- [10] Coen, J.L.: "Modeling Wildland Fires: A Description of the Coupled Atmosphere – Wildland Fire Environment Model (CAWFE)", National Center for Atmospheric Research, 2013.
- [11] Mandel, J.; Beezley, J.D.; Kochanski, A.: "An overview of the coupled atmosphere/wildland fire model WRF-Fire", American Meteorological Society, 2011.
- [12] Linn, R. i dr.: "Studying wildfire behavior using FIRETEC", International Journal of Wildland Fire, 2002.

- [13] Mandel, J. i dr.: “A wildland fire model with data assimilation”, Mathematics and Computers in Simulation, 2008.
- [14] Mandel, J. i dr.: “Data assimilation for wildland fires: ensemble Kalman filters in coupled atmosphere-surface models”, IEEE Control Systems Magazine, 2009.
- [15] P. de V. Booysen i N. M. Tainton: „Ecological Effects of Fire in South African Ecosystems“, 1984.

10. SAŽETAK

Tema rada je izraditi računalne simulacije širenja šumskog požara na području otoka Pašmana. Napravljen je model koji nastoji oponašati temeljna fizikalna ponašanja šumskog požara kao što su njegovo širenje i temperaturu s obzirom na gustoću vegetacije, utjecaja vjetra, nagiba terena. Pomoću matematičkog modela opisani su mehanizmi prijenosa topline zračenjem i konvekcijom koji su ključni za realno kretanje požara. Proračun je implementiran pomoću metode konačnih volumena unutar programa OpenFOAM 5.0. Opisane su dvije simulacije na istoj domeni na otoku Pašmanu kraj naselja Mali Pašman koji prikazuju širenje požara uz pomoć i bez utjecaja vjetra. Rezultati koji su dobiveni daju realistični uvid u prirodu širenja požara na tom području, te se mogu koristiti alat za obranu od šumskog požara na tom području.

Ključne riječi: računalna simulacija, šumski požar, OpenFOAM

11. ABSTRACT

The theme of this thesis was to make a computer simulation of wildfire spread on the island of Pašman. A model was made which predicts the basic physical behaviour of a forest fire which are its spreading and temperature in consideration with the vegetation density, influence of the wind and terrain slope. The heat transfer is described with the help of a mathematical model that takes in consideration the heat transfer by radiation and convection. With that being said a real wildfire motion can be obtained. The calculations are designed with the finite volume method in OpenFOAM 5.0. Two simulations have been conducted on a domain on the island of Pašman near the village called Mali Pašman which show the nature of wildfire spread with and without the affect of the wind. The results give a realistical insight in the nature of wildfire spread on the given territory and can be used as a tool of defense against wildfires on that area.

Key words: computer simulation, wildfire, OpenFOAM