

# Pregled primjene metoda rane detekcije požara u šumama

---

**Nikšić, Martina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:504610>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Martina Nikšić

**ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja **Martina Nikšić**

Predala je izrađen završni rad dana: 4. rujna 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Željka Ujević Andrijić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet  
kemijskog inženjerstva i tehnologije

dr. sc. Srećko Herceg, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Matija Cvetnić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije

dr. sc. Goran Lukač, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred  
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 9. rujna 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Martina Nikšić

**Pregled primjene metoda rane detekcije požara u šumama**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Željka Ujević Andrijić

Članovi ispitnog povjerenstva:

1. Izv. prof. dr. sc. Željka Ujević Andrijić
2. dr. sc. Srećko Herceg
3. Doc. dr. sc. Matija Cvetnić

Zagreb, rujan 2024.

## SAŽETAK

Senzori za detekciju i praćenje požara u šumama igraju ključnu ulogu u suvremenim sustavima za rano otkrivanje i sprječavanje nastanka požara. Ovi sofisticirani uređaji osmišljeni su kako bi prepoznali različite znakove požara, poput prisutnosti dima, povišenja temperature, ili povećane koncentracije plinova, te pravovremeno upozorili nadležne službe ili korisnike, minimizirajući time rizik od ozbiljnih posljedica.

Rad opisuje primjenu nekoliko vrsta senzora za detekciju požara, od kojih su najčešći termalni, optički, i ionizacijski senzori. Kombinacijom ovih tehnologija postiže se visoka razina pouzdanosti u detekciji požara u različitim okruženjima, uključujući domaćinstva, industrijske pogone i javne ustanove.

Važnost brze i točne detekcije požara ne može se preneglasiti. Rani uvid u početnu fazu požara omogućuje bržu reakciju vatrogasaca i spašavanje života te imovine. Moderni senzori za praćenje požara često su povezani u mreže koje omogućuju centralizirano upravljanje i praćenje, što dodatno poboljšava efikasnost i brzinu reakcije.

Implementacija senzora za praćenje požara može uključivati i integraciju s drugim sustavima za sigurnost, poput sustava za gašenje požara ili upravljanje ventilacijom. Ova integracija omogućuje automatizirane odgovore na požar, uključujući kontrolu prometa zraka radi sprječavanja širenja dima.

Uz napredak tehnologije, senzori za praćenje požara postaju sve sofisticiraniji, s mogućnostima kao što su analiza podataka u stvarnom vremenu, predikcija pojave požara i daljinsko upravljanje. Ovi napredni sustavi pomažu u smanjenju rizika od požara, što je ključno za zaštitu ljudi, imovine i okoliša.

Senzori za praćenje požara su nezamjenjivi alati za održavanje sigurnosti u suvremenom svijetu, pružajući ranu detekciju i omogućujući brze reakcije koje spašavaju živote i imovinu.

**Ključne riječi:** detekcija požara, senzori za praćenje požara, Copernicus

## **ABSTRACT**

Fire detection and monitoring sensors in forests play a crucial role in modern systems for early fire detection and prevention. These sophisticated devices are designed to detect various signs of fires, such as the presence of smoke, rising temperatures, or increased gas concentrations, and to promptly alert the relevant authorities or users, thereby minimizing the risk of severe consequences.

This thesis describes the application of several types of fire detection sensors, with the most common being thermal, optical, and ionization sensors. The combination of these technologies ensures a high level of reliability in fire detection in various environments, including households, industrial facilities, and public institutions.

The importance of quick and accurate fire detection cannot be overstated. Early awareness of the initial phase of a fire allows for a faster response by firefighters, saving lives and property. Modern fire monitoring sensors are often connected in networks that enable centralized management and monitoring, further improving efficiency and response speed.

The implementation of fire monitoring sensors can also include integration with other safety systems, such as fire suppression systems or ventilation control. This integration allows for automated responses to fires, including the activation of sprinkler systems or air traffic control to prevent the spread of smoke.

With technological advancements, fire monitoring sensors are becoming increasingly sophisticated, with capabilities such as real-time data analysis, fire prediction, and remote control. These advanced systems help reduce fire risks, which is crucial for protecting people, property, and the environment.

Fire monitoring sensors are indispensable tools for maintaining safety in the modern world, providing early detection and enabling rapid responses that save lives and property.

**Keywords:** fire detection, monitoring fire sensors, Copernicus

# Sadržaj

1.	UVOD .....	1
2.	PREGLED METODA RANE DETEKCIJE POŽARA U ŠUMAMA .....	2
3.	METODE OTKRIVANJA POŽARA .....	4
3.1.	Pristup temeljen na toplini.....	4
3.2.	Pristup temeljen na detekciji plinova .....	8
3.3.	Pristup temeljen na detekciji dima .....	12
3.3.	Pristup temeljen na plamenu .....	17
3.4.	Mreže senzora .....	23
3.5.	Metode dubokog učenja za detekciju požara .....	24
3.6.	Protupožarni robotski sustav .....	26
3.7.	Video motrilačke jedinice.....	27
3.8.	Napredni automatski protupožarni nadzorni i motrilački sustavi.....	29
4.	Copernicus program.....	35
4.3.	Usluga za upravljanje izvanrednim situacijama (EMS) .....	36
4.4.	Europski informacijski sustav za šumske požare (EFFIS) .....	37
5.	Zaključak .....	41
	LITERATURA .....	42

# 1. UVOD

Šume, kao ključni dio globalnog ekosustava, pružaju nezamjenjivu ekološku, ekonomsku i društvenu korist. Osim što su stanište za mnoge biljne i životinjske vrste, šume imaju ključnu ulogu u regulaciji klimatskih uvjeta, očuvanju bioraznolikosti te pružanju resursa poput drveta, hrane i ljekovitih biljaka. Međutim, u posljednjim desetljećima svjedočimo sve češćim i intenzivnijim požarima koji ugrožavaju ove dragocjene ekosustave.

Posljedice požara mogu biti razorne i imaju globalni utjecaj kao što je povećanje globalnog zagrijavanja, nepovoljan utjecaj na vremenske prilike, gubitak života te izumiranje rijetkih vrsta. Požari mogu biti uzrokovani ljudskim radnjama poput pušenja ili uporabe otvorenog plamena, ali i zbog prirodnih faktora kao što su munje ili ekstremno visoke temperature. Ključni cilj zaštite od požara je osigurati njihovo rano otkrivanje s minimalnim lažnim alarmima te pružiti brza upozorenja nadležnim tijelima kako bi se smanjile moguće štete. S napretkom u razvoju i primjeni različitih senzora, obradi slike, informacijskim tehnologijama, tijekom posljednjih godina razvile su se brojne metode detekcije požara koje su uvelike smanjile moguće gubitke uzrokovane požarima. [1]

Porast učestalosti i intenziteta požara u šumama posljedica je složene interakcije različitih čimbenika, kao što su klimatske promjene, promjene u upravljanju šumama, nekontrolirano ljudsko djelovanje te promjene u ruralnom i urbano-šumskom suživotu. U takvom kontekstu, rana detekcija požara postaje neizbježna potreba za očuvanje šumskih ekosustava, zaštitu ljudskih života i imovine te očuvanje šumskih resursa. Globalno, milijuni hektara zemljišta godišnje se unište požarima, pri čemu svake godine stradaju tisuće ljudskih i životinjskih života. Ako se širenje vatre pravovremeno ne obuzda, šteta može biti golema. Stoga je najvažnije detektirati požar u njegovoj ranoj fazi kako bi se spriječile štete velikih razmjera.

Ovaj završni rad ima za cilj pružiti sveobuhvatan pregled primjene metoda detekcije požara u šumama, uzimajući u obzir širok spektar čimbenika koji utječu na izbor i učinkovitost tih metoda. Kroz sustavsku analizu dostupne relevantne literature, istražit će se najčešće korištene metode detekcije požara, njihove prednosti, nedostaci i perspektive.

Fokus završnog rada stavljen je na ključne metode detekcije nastajanja požara, kao što su tornjevi i sustavi za nadzor požara, automatski detektori dima, termo kamere, distribuirane mreže senzora te satelitski nadzor. U radu se razmatraju tehnički aspekti metoda, njihova pouzdanost u različitim uvjetima primjene te praktična primjena u stvarnim situacijama.



## 2. PREGLED METODA RANE DETEKCIJE POŽARA U ŠUMAMA

Trenutno stanje rane detekcije požara u šumama varira širom svijeta i ovisi o različitim čimbenicima, uključujući dostupnu tehnologiju, dostupni budžet za zaštitu od požara, geografske karakteristike terena i stupanj razvijenosti sustava za detekciju. U nastavku je kratko opisano nekoliko metoda koje se najčešće koriste za ranu detekciju požara u šumama.

**Tornjevi za nadzor požara:** U nekim područjima postoje tornjevi za promatranje, gdje se obučeno osoblje nalazi na visokim točkama sa širokim vidicima. Oni kontinuirano promatraju okolinu i koriste dalekozore i druge optičke instrumente kako bi otkrili početne znakove požara poput dima ili plamena.

**Sustavi za video nadzor:** Sustavi za video nadzor sa kamerama postavljenim na ključnim lokacijama mogu detektirati plamen ili dim u ranoj fazi. Napredne kamere mogu koristiti algoritme za prepoznavanje požara i automatski obavijestiti nadležne agencije ili spasilačke timove.

**Automatska detekcija dima:** Automatski detektori dima se koriste kako bi otkrili prisutnost dima u šumama. Ovi uređaji se postavljaju na određenim lokacijama i mogu aktivirati alarm ako registriraju dim.

**Termo kamere:** Termovizijske kamere mogu identificirati promjene u temperaturi u šumi i detektirati vruće točke koje ukazuju na prisutnost požara. Ove kamere su posebno korisne u noćnim uvjetima ili uvjetima smanjene vidljivosti.

**Distribuirane mreže senzora:** Distribuirane mreže senzora koje mjere temperaturu, vlažnost, brzinu vjetra i druge veličine mogu detektirati promjene koje ukazuju na početak požara. Ovi senzori često međusobno komuniciraju kako bi identificirali neobične promjene i izdali upozorenje.

**Satelitski nadzor:** Satelitske slike i infracrvene snimke mogu se koristiti za identifikaciju vrućih točaka ili požara iz zraka što je posebno korisno za šumske požare koji se prostiru na velikim površinama.

**Emisije plinova:** detekcija požara na temelju plinskih emisija. Požari često oslobađaju ugljični monoksid (CO) kao produkt nepotpunog izgaranja. Ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) je također produkt izgaranja i često se povećava u prisutnosti požara. Dušični oksidi (NO<sub>x</sub>) su plinovi

koji se također oslobađaju tijekom izgaranja. Njihova prisutnost može ukazivati na požar. Požari često uzrokuju isparavanje vode iz biljaka i tla u šumi te i povećana razina vodene pare može ukazivati na požar. Ovisno o vrsti goriva i materijala koji gori, mogu se oslobađati i drugi plinovi kao što su metan (CH<sub>4</sub>) ili amonijak (NH<sub>3</sub>).

Navedene metode detekcije požara će se detaljnije objasniti u idućim poglavljima.

### 3. METODE OTKRIVANJA POŽARA

Postoji više različitih podjela i pristupa otkrivanju požara, ali općenito se mogu podijeliti na dva pristupa:

- a) korištenje tradicionalnih protupožarnih alarma i
- b) korištenje sustava za otkrivanje požara uz pomoć vizualnih senzora.

Tradicionalni protupožarni alarmi se oslanjaju na senzore koji reagiraju na određene parametre, poput dima ili topline. Tradicionalni detektori požara obično zahtijevaju neposrednu blizinu izvora požara kako bi se aktivirali. Na primjer, senzori dima mogu biti osjetljivi samo na određene razine dima, što znači da u početnoj fazi požara, kada ima malo dima, ovi sustavi mogu trebati više vremena da detektiraju požar. Osim toga, ovi sustavi često zahtijevaju intervenciju ljudi kako bi se potvrdila pojava požara, a često mogu izazvati lažne alarme.

Sustavi za otkrivanje požara potpomognuti vizualnim senzorom koriste vizualne senzore, poput kamera, kako bi detektirali požar. Oni mogu detektirati požar na temelju vizualnih promjena u okolini, poput pojave plamena ili dima. Ovi sustavi mogu biti korisni jer omogućuju bržu detekciju požara, posebno u situacijama gdje tradicionalni senzori mogu biti nedovoljni. Međutim, ovi sustavi također zahtijevaju odgovarajuću analizu slike i mogu biti osjetljivi na vanjske uvjete poput osvjetljenja ili prisutnosti drugih objekata koji mogu izazvati lažne alarme. [2]

#### 3.1. Pristup temeljen na toplini

Budući da požari generiraju toplinu, za njihovo otkrivanje se mogu koristiti senzori topline. Senzori topline su osjetljivi na temperaturu koja je povezana s varijacijom otpora, pomakom i indeksom loma, itd. [3] Općenito, postoje tri vrste toplinskih senzora: oni koji rade na principu fiksne temperature, na principu brzine porasta temperature i na principu brzine kompenzacije. Senzor topline fiksne temperature aktivira se kada temperatura poraste iznad neke granične vrijednosti, najčešće 60 °C. Postoje mnoge vrste fiksnih temperaturnih senzora, kao što su topljivi elementi, bimetalni i distribuirani toplinski senzori. [4] Senzori topline na principu porasta temperature kao i senzori na principu fiksne temperature otkrivaju požar na temelju promjene temperature i aktiviraju se kada se dostignu unaprijed postavljeni uvjeti. Međutim, razlika je u tome što senzori porasta temperature mjere ne samo trenutnu temperaturu već i brzinu njenog rasta te se pri brzom porastu (npr. 10°C u minuti) aktiviraju i prije dostizanja fiksnog temperaturnog praga. Senzori na principu brzine kompenzacije, za razliku od senzora

brzine porasta temperature, nisu fokusirani isključivo na brzinu porasta temperature, već kombiniraju informacije o trenutnoj temperaturi i njezinoj brzini porasta prije potencijalnog aktiviranja.

### *3.1.1. Detektori topline s topljivim elementom*

Detektor topline s topljivim elementom sastoji se od eutektičke legure. Kada se temperatura poveća do eutektičke temperature, legura mijenja stanje iz krutog u tekući lem. Stvara se strujni krug i uslijed otpuštanja opruge pod pritiskom aktivira se alarm. Distribuirani detektor topline sastoji se od uvijenog para električnih vodiča koji su međusobno odvojeni toplinski osjetljivim izolatorom i zatvoreni su u zaštitni omotač. Električni krug stvaraju upleteni vodiči i aktivira se alarm jer izolator mijenja fizičko stanje iz čvrstog u rastaljeno stanje kada je izložen toplini.

#### *3.1.1.1. Toplinski senzori bimetalnog tipa*

Načelo rada toplinskih senzora bimetalnog tipa je toplinska ekspanzija metala. [4] Bimetalni toplinski senzor radi prema mehanizmu toplinskog širenja metala. Dva metala s različitim brzinama širenja spojena su zajedno u jedan komad metala koji se koristi kao bimetalna traka u protupožarnim alarmima. Otvoreni strujni krug zatvara se pomoću trake koja aktivira alarm kao posljedica topline. Izolator osjetljiv na toplinu odvaja jedan ili više kabela od optičkih vlakana koji su zaštićeni vanjskim omotačem u optomehaničkim detektorima topline. Optički kabel prenosi fokusirani svjetlosni signal. Kada je izložen toplini, izolator osjetljiv na toplinu mijenja stanje iz krutog u rastaljeno stanje što rezultira prekidom fokusiranog svjetlosnog signala. Alarm se aktivira pomoću uređaja koji prati promjenu signala. Elektronički tipovi detektora topline koriste jedan ili više termistora za detekciju temperature. [2] Na slici 1a prikazan je bimetalni toplinski senzor. Kada temperatura poraste, bimetalna traka se savija prema metalu s niskim koeficijentom toplinskog širenja.

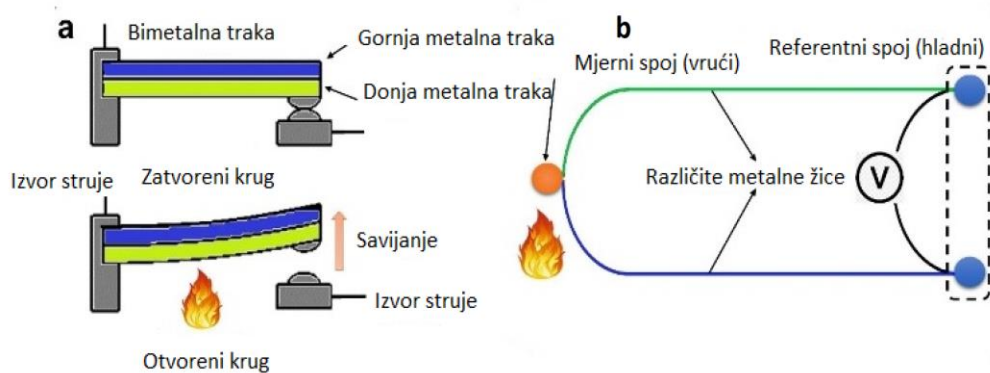
#### *3.1.1.2. Distribuirani toplinski senzori*

Distribuirani toplinski senzori dijele se u tri skupine: električni, termoelementi s plaštem i distribuirani toplinski senzori s optičkim vlaknima.

#### **Električni toplinski senzori**

Električni toplinski senzori i termoparovi rade prema načelu promjene otpora žice i temperature površine (slika 1b). [5] Električni detektori topline rade s termoelektričnim

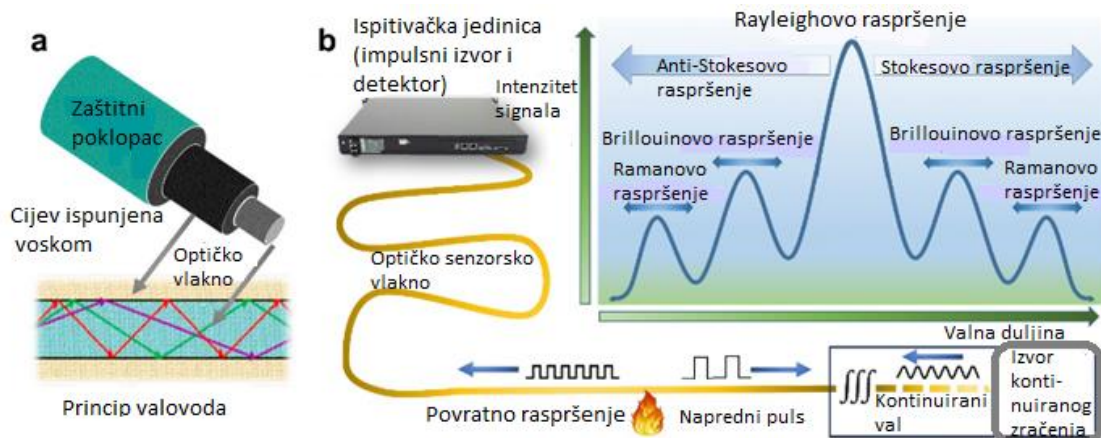
učinkom, koji koristi jedan ili dva termistora za detekciju temperature. Električni, optički i termoelementi s plaštom tri su kategorije distribuiranih toplinskih senzora. U slučaju požara dolazi do promjene nekih parametara kabela s temperaturom.



**Slika 1.** *Senzori topline: (a) načelo rada senzora s bimetalnom trakom; (b) načelo rada termoelementa [6]*

### Distribuirani detektori topline s optičkim vlaknima

Jedna od povoljnijih tehnologija detekcije topline u svrhu protupožarne sigurnosti je primjena temperaturnih senzora s distribuiranim optičkim vlaknima. [7] Senzor s optičkim vlaknima, za razliku od ostalih senzora topline, koristi cijelo optičko vlakno kao detekcijski medij. Mjerenja temperature mogu se provesti duž optičkog kabela na bilo kojoj točki. Temperatura koja se bilježi kreće se od 160 °C do 800 °C, a ograničena je samo izdržljivošću vlakna ili, točnije, njegovim glavnim premazom. Kabel senzora od optičkih vlakana brzo reagira na temperaturne varijacije zahvaljujući svojoj maloj masi u usporedbi s tradicionalnim sensorima topline. Sam optički kabel je čvrst, elastičan i prilagodljiv raznim geometrijama, te se može postaviti izravno ili u blizini zaštićenih područja. Koriste se za zaštitu od požara u nekim izazovnim prostorima, kao što su tuneli, pokretne linije, podzemne željeznice i postaje, čeličane i petrokemijska industrija. [8] Distribuirani toplinski senzori od optičkih vlakana detektiraju požar na temelju Rayleighovog ili Ramanovog raspršenja. [9] Na primjer, Meacham et al. [10] izumili su kabelski senzor Rayleighovog raspršenja koji se sastoji od tri glavne komponente: optičkog vlakna, cijevi ispunjene voskom i zaštitnog poklopca (Slika 2a). Kada se zagrije vosak se počinje topiti i širiti, stvarajući razliku u reflektiranoj svjetlosti. Maksimalni domet detekcije ovakvog sustava je do 2 km. Glavni nedostatak sustava je što ne jamči porast temperature tijekom vremena i ima samo jedan alarm kojeg pokreću temperature između 40 i 90 °C.



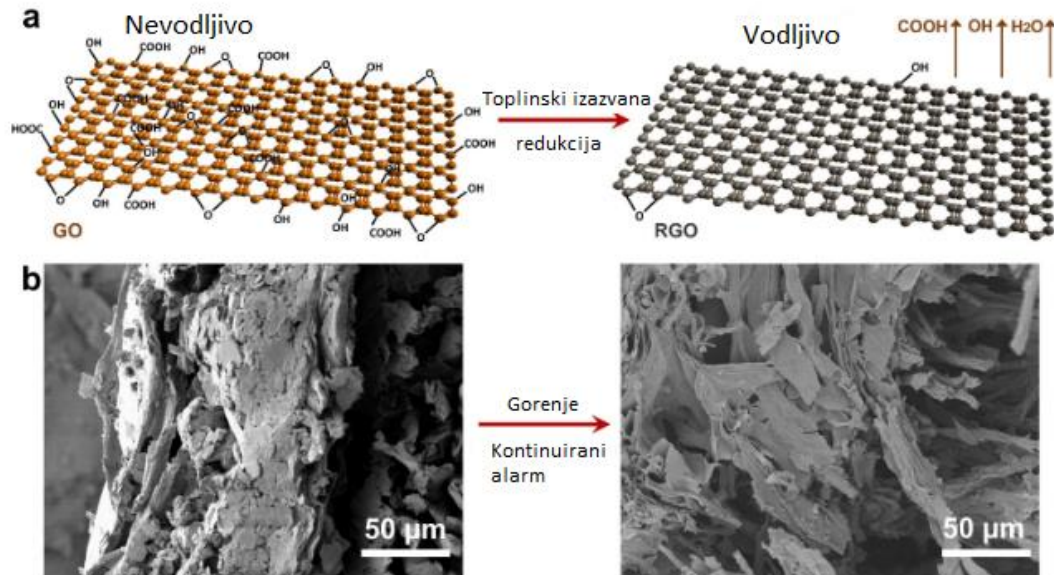
**Slika 2.** Optičko vlakno: (a) tipični presjek i princip valovoda; (b) osnovna shema postavljanja senzora požara i različitih komponenti raspršenja u optičkim staklenim vlaknima [6]

Senzor od optičkih vlakana s Ramanovim raspršenjem očitava temperaturu izračunavanjem omjera intenziteta signala Stokesovog i anti-Stokesovog povratnog raspršenja kao funkciju temperature. Ramanov sustav ima maksimalni raspon senzora do 4 km, a njegova prostorna razlučivost se kreće od 8 do 1 m, ovisno o vremenu odziva i zahtjevima temperature rezolucije. Brillouinov svjetlovodni sustav raspršenja svjetlosti (BLS) je održiva alternativa Rayleighovu i Ramanovom raspršenju za mjerenje temperature. [11] BLS percipira promjenu temperature procjenjujući intenzitet Brillouinova povratnog raspršenja i njegovu varijaciju frekvencije kao funkciju temperature. [12] Slika 2b ilustrira opću shemu postavki senzora i komponenti raspršenja za Rayleighovo, Brillouinovo i Ramanovo raspršenje u optičkim silikatnim vlaknima. U literaturi se mogu naći i druge visokoučinkovite izvedbe optičkih kabela za detekciju temperature, odnosno vatre kao što su izvedbe od Dong i sur. [40], Wang i sur. [41] te Hoff i sur. [32].

### Senzori toplinskog otpora

Senzori toplinskog otpora se temelje na redukciji grafen oksida (GO) na visokoj temperaturi. Senzor požara temeljen na GO predstavlja novi pristup za učinkovito i pravovremeno otkrivanje opasnosti od požara. GO ima nisku električnu vodljivost, ali pri susretu s vatrom ili visokom temperaturom, GO se toplinski reducira u grafen (rGO) s visokom električnom vodljivošću kroz razgradnju funkcionalnih skupina koje sadrže kisik, kao što su karboksilne skupine, epoksi skupine i hidrosilne skupine. [16] Otkrivanje plamena i topline se događa zbog detekcije u promjeni električnog otpora GO (izolatora), koji se pretvara u rGO

(vodič) u prisutnosti vatre, odnosno topline (Slika 3a). Još jedna ključna značajka ovih senzora je da moraju biti otporni na plamen kako bi alarmni signali trajali što je dulje moguće. Zapaljivi materijali (npr. pamuk, papir, drvo i pjena) koriste se kao supstrat u ovim sensorima jer su osjetljivi na vatru i toplinu i brzo se razgrađuju. Kao što je prikazano na slici 3b, pamučna tkanina koja je korištena kao podloga zadržala je svoju strukturu nakon izlaganja vatri.



**Slika 3.** (a) Smanjenje GO izazvano toplinom; (b) SEM slike poprečnog presjeka GO/PDMAEMA/BN tkanine prije i poslije spaljivanja [6]

Izrada premaza na bazi GO koji usporavaju plamen je jedan od obećavajućih načina za prevladavanje opasnosti od požara. [6]

### 3.2. Pristup temeljen na detekciji plinova

Vegetaciju čine uglavnom polimerni organski spojevi koji u požaru piroliziraju, isparuju te se oksidiraju s kisikom iz zraka. Ugljik se u najvećoj mjeri oksidira do ugljikovog dioksida, a manji dio završi kao ugljikov monoksid. Nastaje i obični ugljik - čađa. Pored tih ugljikovih spojeva, dio ugljika završi u mnogim drugim organskim spojevima, kao produkt oksidacije ili pirolize: cijanovodik, klorovodik, akrolein i drugi. U značajnoj mjeri susreću se i dušikovi oksidi. To su glavni produkti gorenja. Uz njih nastaje stotine drugih organskih spojeva u manjim koncentracijama. Veliku skupinu predstavljaju hlapljivi organski spojevi (engl. *Volatiles organic compounds*, tj. VOC). Uvjeti gorenja nisu doveli do njihove krajnje oksidacije te se oni slobodni šire u atmosferu. Lako su hlapivi te pod djelovanjem atmosferskih uvjeta i sunčevog svjetla poslije oksidiraju.

U požaru nastaje toplina koja se dijelom prenosi na požarne plinove. Takvo zagrijavanje plinova stvara uzgon te se oni zbog tog razloga šire vertikalno. Osim uzgona, na širenje plinova značajno utječu atmosferske prilike: jačina i smjer vjetra, vertikalno strujanje zraka izazvano sunčevim zagrijavanjem tla, prepreke i obilježja terena. Na raspršenje požarnih produkata odnosno njihov smjer i brzinu utječu brojni čimbenici, a matematičko modeliranje tih procesa je vrlo kompleksan zadatak. Hlapljivi organski spojevi su teži od zraka te se brže od drugih spuštaju kako bi zauzeli ravnotežno mjesto u atmosferi, primjereno uvjetima strujanja zraka i difuzije. Drugim riječima, za očekivati je da će VOC prije doći do senzora na tlu ili drveću od požarnih produkata koji su lakši od njih te se nastoje širiti u visinu.

Zadnja dostignuća u razvoju plinskih senzora omogućuju otkrivanje hlapljivih organskih spojeva (VOC), hlapljivih sumpornih spojeva, vodika, ugljikovog monoksida i drugih spojeva u koncentraciji dijelova na milijardu (ppb). Prisutnost VOC-a na otvorenom prostoru na mjestima gdje se ne očekuju industrijske kemikalije, upućuje na požar te bi se načelno moglo iskoristiti za rano otkrivanje požara

Parametri kvalitete čistog zraka razlikuju se od parametara kvalitete zraka tijekom požara. Za smrt žrtava u požaru najčešće su odgovorni otrovni plinovi poput ugljikova monoksida i vodikovih cijanida. [4] Povećanje razine ugljičnog monoksida obično rezultira smanjenjem razine kisika. Tinjajuću vatru karakterizira niska promjena koncentracije kisika te se naziva i požarom niskog intenziteta. Velika promjena u koncentraciji kisika ukazuje na požare tekućeg goriva ili brzogoreće požare.

Plinovi se emitiraju u svakoj fazi izgaranja, a jedinstvene karakteristike svakog od plina mogu se koristiti za pouzdano otkrivanje požara.

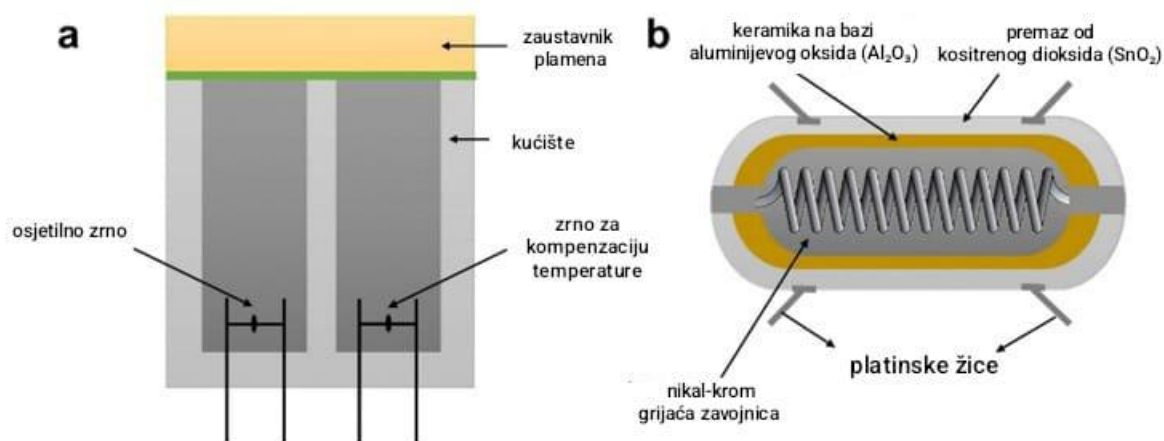
Kemijski sastav dima može dosta varirati kod raznih vrsta požara, ovisno o njihovom izvoru. CO je najpogodniji od četiri upozoravajuća plina, pojavljuje se u svim vrstama požara. Protupožarni senzori CO koji rade na sobnoj temperaturi, zahtijevaju izvor male snage u usporedbi s tradicionalnim detektorima i mogu zaštititi od tinjajuće vatre, uključujući izgaranje organskih materijala u kojima se u ranoj fazi procesa izgaranja emitiraju značajne količine ugljičnog dioksida.

### *3.2.1.1. Senzori plina s poluvodičkim metalnim oksidom*

Od brojnih vrsta senzora plina, poluvodički senzori od metalnih oksida (MOS) dobili su dosta pozornosti zbog svoje niske cijene, jednostavnosti rada, a visoke osjetljivosti kao i



sposobnosti reagiranja na širok raspon kemikalija. Međutim, ti senzori imaju problema sa stabilnošću te mogu pokrenuti lažne alarme. Selektivnost plinskih senzora može se poboljšati nanošenjem određenih slojeva materijala, poput zeolita, na metalne okside. [17] Molekule određenih dimenzija mogu se prosijati i pustiti da uđu u pore zeolita. Zbog toga su zeoliti korisni za odvajanje plinova.



**Slika 4.** Senzori plinova: (a) sensor zapaljivih plinova s katalitičkim kuglicama; (b) otpornički sensor na bazi poluvodiča metalnog oksida (MOS) [6]

Mehanizam senzora za detekciju plina temeljen na MOS-u primarno se temelji na promjenama u otporu uzrokovanim kemijskim interakcijama između molekula ciljnog plina i adsorbiranih iona kisika na površini MOS-a kada su izloženi ciljnim plinovima. Međutim, imaju problem sa stabilnosti što dovodi do pojave lažnog alarma. Primjenom dodatnih slojeva (poput zeolita) preko metalnih oksida, može se poboljšati stabilnost ovih senzora. [18] Neki kompozitni materijali također pokazuju kvalitetne performanse za plinske senzore ove vrste. [80] Upotreba polimera u primjeni senzora plinova poboljšava osjetljivost, jer se njihove razine dopiranja lako modificiraju kemijskim interakcijama s različitim analitima na temperaturi okoline, dajući jednostavnu tehniku za detekciju plinskih analita. [20] Kako bi otkrili požare elektroničkih uređaja, Riches et al. [21] testirali su osjetljivost senzora površinskih akustičnih valova (SAW) i senzora s poluvodičkim metalnim oksidima (MOS). SAW detektor detektira požar procjenjujući promjenu frekvencije uzrokovanu apsorpcijom plina ili pare na površini piezoelektričnog kristala. Vodljivost ploče od metalnog oksida u organskoj pari mjeri se MOS sensorom koji detektira vatru. U literaturi se mogu naći različite izvedbe MOS senzora kao što su Mandayo et al. [22] za detekciju CO. Abid et al. razvili su senzor za otkrivanje plinova povezanih s požarom, kao što su benzen, CO i izopropanol. [23] Nova klasa senzora s metalnim oksidima za otkrivanje požara koristi metalne grijače, kao što je Pt, Pd, Ag, Ni, i Cr za podizanje

temperature senzora na željenu vrijednost. [24] Kao rezultat toga, razvijeni su jednostavni i jeftini plinski senzori temeljeni na mjerenju otpora uređaja (slika 4b).

### 3.2.1.2. *Optički senzori plina*

Optička metoda detekcije plina koja se temelji na principima spektroskopije je dosta pouzdana i osjetljiva te ima kratko vrijeme odziva. Međutim, njihova cijena je visoka i dosta su velike veličine. Heidari i sur. [25] predložili su optičku tehniku u umanjenom obliku za izradu ovakvih plinskih senzora. Njihova tehnologija koristi mikrofluidnu penetraciju i idealna je za otkrivanje CO<sub>2</sub>, CO i drugih plinova. Dankner i sur. [26] dizajnirali su elektroničko-optički senzor plina koji može nadzirati i odašiljati signale alarma prije požara ili eksplozije i detektirati zapaljivi parafin, arome i vodikov sulfid u niskim koncentracijama. Nadalje, razvijeni plinski senzor može raditi u različitim uvjetima okoline, uključujući kišu i maglu.

### 3.2.1.3. *Katalitički kuglični senzori*

Katalitički kuglični senzori, poznati kao pelistori, najčešći su senzorski elementi za detekciju koncentracije zapaljivih plinova u zraku (Slika 4a). Mogu se koristiti u mobilnoj i stacionarnoj opremi u rudnicima i drugim industrijama za indikaciju prisutnosti eksplozivnih uvjeta. Jedan od njihovih problema je da njihovi izlazni signali fluktuiraju s promjenama temperature okoline. U slučaju eksplozivnih situacija, to može rezultirati lažnim alarmima ili pak nedostatkom reakcije. [27]

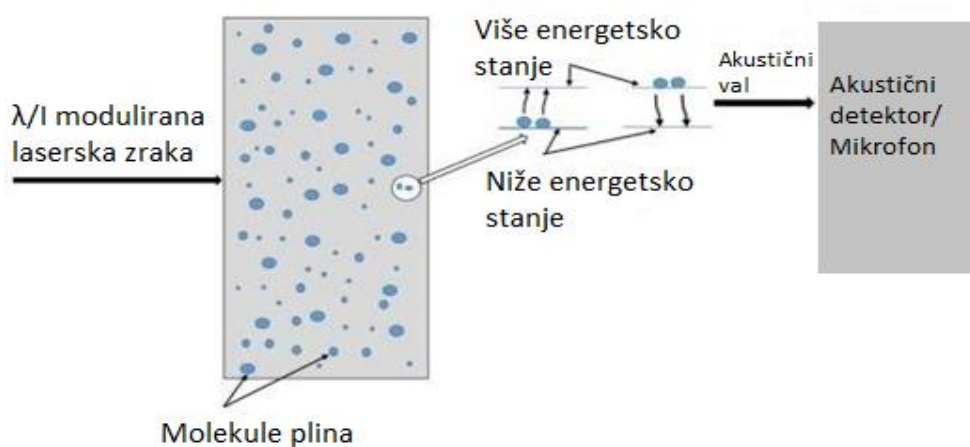
### 3.2.1.4. *Akustični senzori plina*

Metoda detekcije plina temeljena na akustici prikazuje promjenu u brzini akustičnog vala zbog varijacije određenih parametara (kao što je masa) senzornog materijala. [28,29] Kroz mjerni plin prolazi laserska zraka modulirana valnom duljinom ili intenzitetom. Energija laserskih zraka se apsorbira i emitira pri čemu se proizvodi akustični val koji se osjeti pomoću akustičnog senzora. [30] Veličina akustičnog vala daje informacije o koncentraciji plina.

Laserska zraka modulirana valnom duljinom ili intenzitetom dizajnirana je da prolazi kroz ispitni plin kao što je prikazano na slici 5. [31] Molekule plina apsorbiraju i otpuštaju energiju laserske zrake, stvarajući akustični val koji detektira akustični detektor. Informacije o koncentraciji plina daju se na temelju veličine akustičnog vala. [2]

Senzori površinskih akustičnih valova također se mogu koristiti za otkrivanje požara u teškim uvjetima. Mali su i snažni i mogu raditi u uvjetima promjenjive frekvencije i velike

propusnosti. Ovi senzori su bežični, pasivni i manje podložni zračenju. Stoga su korisni za područja poput industrije i zrakoplovstva, te svemirskim postajama.



**Slika 5.** Senzori plina temeljeni na akustičnim valovima [2]

### 3.2.1.5. Ostali senzori plina

Metodu identifikacije plina temeljenu na klasifikacijskim algoritmima predložili su Shi et al. [32] za precizno otkrivanje požara. Mjerenje temperatura, koncentracija plinova CO i CO<sub>2</sub>, može se koristiti za rano prepoznavanje požara. Bežični uređaj za mjerenje plinova kao što su CO<sub>2</sub> i CO s temperaturom i vlažnosti okoline razvili su Kumar et al. [33] Istraživači su također istraživali upotrebu FTIR spektrometra za detekciju požara. [34] FTIR promatra spektar od 2,5 do 25 mm i mjeri postojanje nekoliko interesantnih vrpca, omogućujući pravovremeno otkrivanje požara. FTIR mjerenja također pružaju veliku količinu drugih podataka uključujući različite monomere, olefine, neizgorena goriva, oksalate i proizvode pirolize. [35]

### 3.3. Pristup temeljen na detekciji dima

Detekcija dima je jedan od ključnih načina u sprječavanju katastrofa i incidenata izazvanih požarom. Trenutno postoji značajna potražnja za automatskim nadzornim sustavima za detekciju dima koji brzo reagiraju i zahtijevaju niske troškove održavanja. U ranoj fazi požara, kada plamen još nije vidljiv, gorući materijali ispuštaju dim koji zauzima veći volumen. U takvim situacijama, incident se može otkriti iako je izvor požara skriven iza drugih objekata, poput ograda.

Dim se emitira mnogo ranije od ostalih karakteristika požara tijekom faza rasta i razvoja. U početnim fazama požara, brzo otkrivanje dima povećat će vjerojatnost učinkovitog

suzbijanja požara, uspješnog gašenja požara, bijega i preživljavanja. Prolaskom svjetlosne zrake ili elektromagnetskog zračenja preko čestica može se detektirati dim. Masena koncentracija dima, volumni udio i širenje dima poznati su kao primarni parametri detekcije dima. Detektori dima bi trebali reagirati na izgaranje i dim koji nastaje plamenom jer postoje značajne razlike u strukturi i sastavu dima koji nastaje u požarima. [36] Dim koji proizvodi plamen koji gori često je veći od čestica proizvoda izgaranja. Tijekom izgaranja vatra stvara dim, koji se sastoji od čvrstih čestica, tekućih čestica i plinova u zraku. Nastaje izgaranjem materijala i smanjuje kvalitetu zraka u okolišu. [37] Za mjerenje dima koriste se nevizualne i vizualne tehnike.

### *3.3.1.1. Nevizualna detekcija dima*

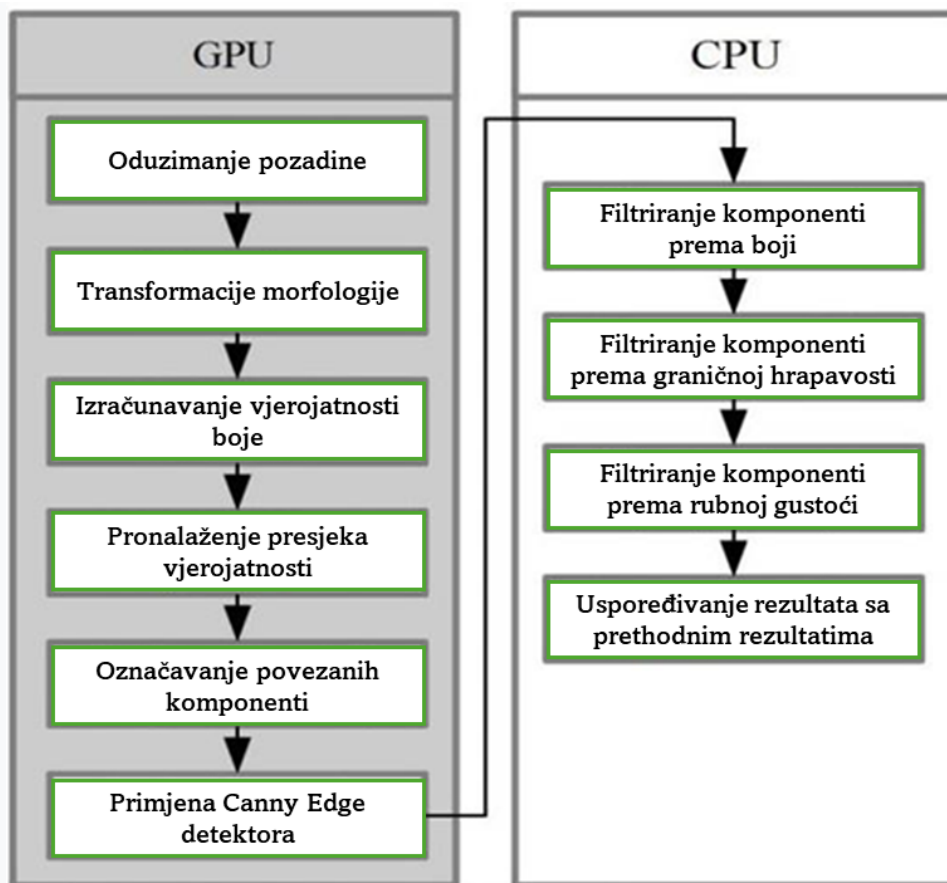
Mjerenje dima ovisi o uvjetima izgaranja, poput pirolize, plamena i tinjanja. Koje će se metode detekcije dima primijeniti ovisi o vrsti požara i njegovoj lokaciji. Tehnologija mjerenja dima koja se temelji na fotoelektričnom principu posebno se koristi za tinjanje i može brže otkriti vatru. Detektori unutar senzora su postavljeni pod kutom u odnosu na izvor svjetlosti i u normalnim uvjetima zrake ne dopiru do detektora jer je njihova putanja izravna i neprekinuta. U prisutnosti dima dolazi do raspršivanja zračenja pri čemu dio zračenja dolazi do detektora i alarm se aktivira. Količina dima u zraku određuje sposobnost dima da raspršuje svjetlost, što se mjeri kroz razliku u disperziji svjetlosti optičkim uređajem, dok fotoelektrični senzor dima izračunava razinu dima. [38] Kod ionizacijskih senzora dim se mjeri kroz razinu ionizacije zraka ionizacijskim senzorom dima. Otkrivanje se provodi stvaranjem potencijalne razlike između komora i mjerenjem nastale struje. Detektor dima u ionizacijskoj komori (ICSD) detektira vatru kada čestice dima dospiju u ionizacijsku komoru i promijene struju ometajući protok iona. Na kretanje iona utječu temperatura, tlak, sastav plina i vlaga. Jedna vrsta ICSD-a s odvojenim ionizacijskim komorama je dizajnirana za postizanje osjetljivosti detekcije; jedna je komora potpuno zatvorena i neovisna o okolini, dok je druga izložena okolnom zraku. [39]

Indukcijski detektor s više točaka, koji kombinira detekciju dima s drugim vrstama senzora, smatra se dobrom opcijom jer pruža raznolik raspon mogućnosti detekcije i minimizira lažne uzbune bez smanjenja osjetljivosti detektora dima. [40] U literaturi se mogu naći brojne druge vrste senzora detekcije dima. Kao zamjena za ionizacijske detektore kreiran je detektor s više senzora za otkrivanje gorućeg i tinjajućeg plamena kombiniranjem optičke detekcije dima s toplinskim senzorom. [41] Druga istraživanja multimodalnog senzora uključuju

detektore koji kombiniraju fotoelektrični i plinski senzor, zatim ionski i plinski senzor. Liu i sur. [42] predložili su detektor čestica dima s filmom amornog silicija kao izvorom zračenja. Vrlo osjetljivi detektor dima predstavili su Bakhoum et al. [43] u kojem alfa čestice utječu na izlazni terminal MOSFET-a i stvaraju pozitivan naboj. Nalet čestica dima u području detektora smanjuje količinu alfa čestica na terminalu vrata, uzrokujući smanjenje struje što ukazuje na povećanje količine dima. Aspey i sur. [44] osmislili su optički uređaj za detekciju dima, sastavljen od optičkog vlakna, bijele polikromatske LED diode, prozora od Pyrex stakla i fotodiode.

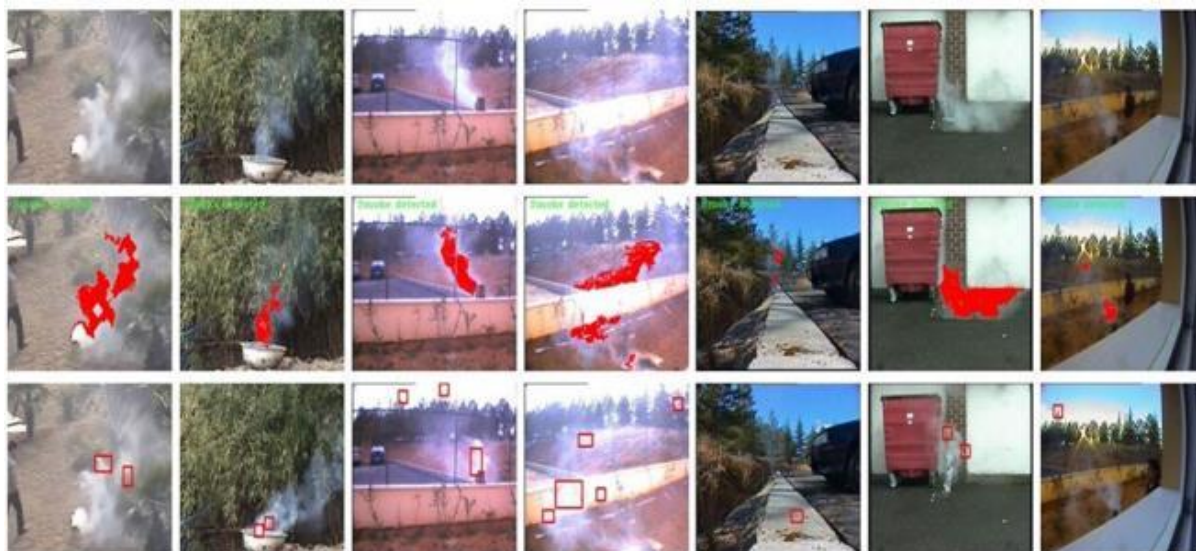
### *3.3.1.2. Vizualna detekcija dima*

I dim i vatra mogu se snimiti kamerama. Protok dima je brži i obično se pojavljuje na početku požara, ali ga je u usporedbi s detekcijom plamena, teško detektirati. [45] Problem koji se razmatra u ovom radu je detekcija dima ispred stacionarne kamere. Dim može biti rani pokazatelj požara, a njegovo brzo otkrivanje može smanjiti štetu uzrokovanu požarom. Budući da jeftini nadzorni sustavi obično koriste kamere niske rezolucije, algoritam bi trebao raditi brzo i moći detektirati dim iz video zapisa niske rezolucije. Međutim, sada su dostupne i jeftine kamere visoke razlučivosti (HD), no čiji se podaci ne mogu brzo obraditi postojećim nadzornim algoritmima. U ovom radu predstavljena je metoda detekcije dima za nadzorne kamere koja se oslanja na značajke oblika područja dima te informacije o boji.



**Slika 6.** Shema paralelnog rada CPU-a i GPU-a za brzu obradu videozapisa niske i visoke razlučivosti [2]

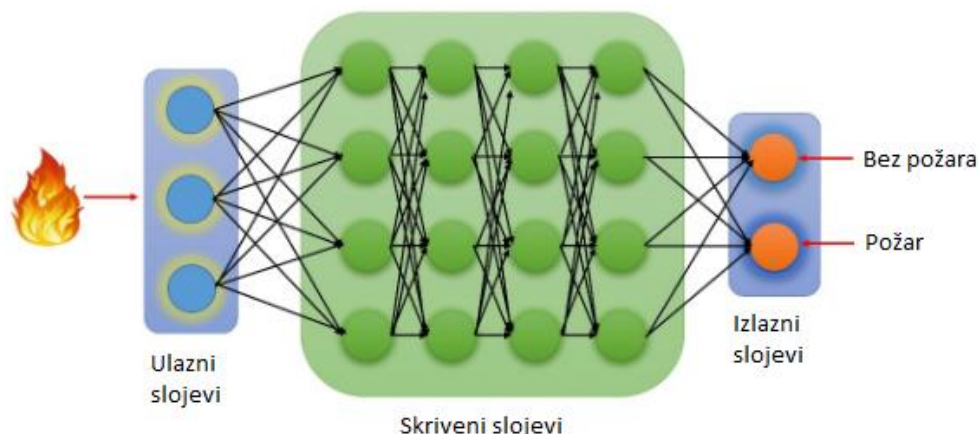
Predložena tehnika koristi stacionarnu kameru za otkrivanje promjena u sceni putem oduzimanja pozadine. Boja dima koristi se za procjenu vjerojatnosti da pikseli scene pripadaju području dima koje je prisutno na kadru. Zbog promjenjivog intenziteta dima, svi pikseli dima nisu uvijek prisutni u maski prednjeg plana (engl. *foreground mask*). Ovi odvojeni pikseli kombinirani su s morfološkim operacijama i metodama označavanja povezanih komponenti. Prisutnost dima potvrđuje se analizom hrapavosti granice. Završni korak algoritma je testiranje gustoće rubnih piksela. Usporedba objekata u trenutnom i prethodnom kadru provodi se kako bi se razlikovala područja tekućeg dima od krutih objekata u pokretu. Neki dijelovi algoritma poboljšani su paralelnom obradom pomoću CUDA GPU-a, što omogućuje brzu obradu videozapisa niske i visoke razlučivosti. Hibridni pristup korištenja CPU-a i GPU-a u algoritmu koristi paralelizaciju za ubrzanje, omogućujući obradu HD videozapisa u manje od 200 ms, dok CPU sam postiže manje od dva kadra u sekundi. [46] Algoritam je testiran na više video sekvenci i pokazao je odgovarajuće vrijeme obrade za različit raspon veličina okvira. [47]



**Slika 7.** Rezultati detekcije požara algoritmom (drugi red) i detekcije (treći red) [2]

U literaturi se mogu naći različiti pristupi vizualne detekcije dima. Gubbi i sur. [48] detektirali su dim putem blokovskog pristupa diskretnim kosinusnim transformacijama i valovima. Kako bi eliminirali lažne pozitivne rezultate uzrokovane heurističkom funkcijom, Ko et al. [49,50] predložili su mapu osvjetljenja i pristup otkrivanju požara temeljen na algoritmu Bayesove mreže koji podržava algoritam potpornih vektora (SVM), no potreban je veliki broj kadrova, pa je vrijeme odgovora dugo. U video detekciji, Yuan et al. [51] koristili su dinamičku analizu teksture za otkrivanje dima. Qureshi i sur. [52] razvili su sustav za detekciju plamena i dima temeljen na znakovima boje i kretanja. Yuan i sur. [53] spojili su *AdaBoost* algoritam s tehnikom pretraživanja stubišta za detekciju dima i upotrijebili dinamičku analizu kretanja dima za poboljšanje učinkovitosti detekcije dima. Konvolucijske neuronske mreže (CNN) omogućile su sustavima koji se temelje na vizualnim metodama da detektiraju vatru i dim tijekom nadzora. [54] Khan i sur. [55] predložili su okvir za rano otkrivanje požara za CCTV sigurnosne kamere koje koriste CNN mreže za otkrivanje dima u različitim unutarnjim i vanjskim scenarijima, te su sukladno tome predložili model za maglovita okruženja koristeći arhitekturu semantičke segmentacije. [56] Slika 9 prikazuje osnovni model CNN algoritama dubokog učenja. [6]





**Slika 8.** Shematski prikaz konvolucijskih neuronskih mreža (CNN) za otkrivanje požara [6]

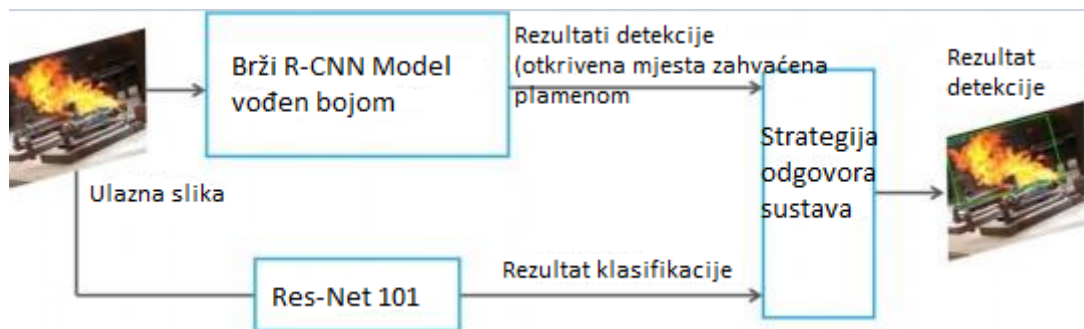
### 3.3. Pristup temeljen na plamenu

Plamen može imati različite oblike, boje i teksture, te je vrlo izazovno odrediti oblik plamena na slikama. Uz konvencionalne metode detekcije plamena, često se za detekciju plamena koriste umjetne značajke. [2]

Vatra predstavlja izvor zračenja, koji se može detektirati identificiranjem zračenja stvorenog u zoni izgaranja. [57] Plamen, kao vidljivi dio vatre, nastaje egzotermnom reakcijom između goriva i oksidansa, a temperatura plamena ovisi o materijalu koji gori. [58] Plamen ima dvije osnovne značajke: boju (kromatska svojstva) i zračenje. Detekcija plamena može se provoditi korištenjem nevizualnih ili vizualnih tehnika. Nevizualna tehnika temelji se na zračenju plamena, dok se vizualna tehnika temelji na boji plamena. [6]

Kako bi se riješio problem visoke stope lažnih alarma pri korištenju izravne detekcije uobičajenih objekata u metodi detekcije plamena, predlaže se korištenje metode detekcije vođene plamenom. Ova strategija koristi istu mrežu za stvaranje informacija o globalnoj slici. Kao što je prikazano na Slici 9 [59], koriste se dvije metode za poboljšanje *Faster R-CNN* (Regije sa značajkama konvolucijske neuronske mreže) za otkrivanje mjesta zahvaćenog plamenom na kontrolirani način [60]. Provedeno istraživanje na bazi podataka *BoWFire* pokazalo je da je ova metoda poboljšala brzinu akvizicije za 10,1% u usporedbi s originalnim *Faster R-CNN* mrežama, dok je stopa lažnih alarma smanjena za 21,5%. [2]





**Slika 9.** *Struktura modela globalne informacijski vođene detekcije plamena [2]*

### 3.3.1.1. Vizualne metode ranog otkrivanja požara koje se temelji na obradi slike

Detekcija požara može se temeljiti na korištenju **značajki boje požara**. Vatra obično ima crvenkastu boju, ali boja vatre varira ovisno o temperaturi vatre. Kada je temperatura vatre niska, boja vatre bit će crvena do žuta. Kada je temperatura vatre visoka, boja vatre bit će bijela. Također, boja vatre tijekom dodatnog izvora svjetla ili dnevnog vremena ima veću zasićenost u usporedbi s noćnim vremenom ili bez izvora svjetla. Stoga se ove značajke boje vatre koriste za otkrivanje pravog požara.

#### Detekcija požara na temelju RGB modela boja

Iako postoji mnogo boja vatre, vatra koja se razbuktava obično pokazuje crvenu do žutu boju. Povezana RGB vrijednost označena je kao  $R \geq G$  i  $G > B$ .  $R$  bi trebao dati veću vrijednost kod područja zahvaćenog požarom, te  $R$  vrijednost treba biti veća od praga  $R_T$ . Uvjeti pozadinskog osvjetljenja mogu utjecati na zasićenost vatrom ili mogu postojati dijelovi nalik vatri što uzrokuje pogrešno otkrivanje odnosno detektiranje požara.

Dolje su navedena tri pravila temeljena na RGB vrijednosti za izdvajanje piksela iz slike koji upućuju na vatru:

$$\text{Pravilo 1: } R \geq G > B \quad (1)$$

$$\text{Pravilo 2: } R > R_T \quad (2)$$

$$\text{Pravilo 3: } S \geq \left( (255 - R) \cdot \frac{S_T}{R_T} \right) \quad (3)$$

Ovdje se razmatraju dva slučaja lažnog alarmiranja zbog pojave boje nalik vatri: predmeti boje vatre i izvori svjetlosti boje vatre. Objekti s crvenom bojom obično se izdvajaju kao prava vatra iz slike i to uzrokuje lažno otkrivanje vatre. Drugi izvori svjetlosti poput

refleksije sunca, umjetne rasvjete uzrokuju lažnu detekciju požara. Stoga se za razlikovanje požara od vatrenih alijasa koriste dinamičke značajke požara koje obuhvaćaju promjenjivi oblik, neočekivane pokrete i brzinu rasta. Poremećaj požara definira se kao razlika snimljena između dvije uzastopne slike, a poremećaj požara trebao bi biti viši od praga poremećaja. Brzina požara ovisi o vrsti goriva i protoku zraka. Neka  $m_i$  i  $m_{i+1}$  označavaju vrijednosti vatrenih piksela trenutne slike i sljedeće slike. Ako  $m_{i+1} > m_i$  tada postoji rastuća brzina požara. Ako su ovi uvjeti zadovoljeni, može se tvrditi da je detektirana vatra prava vatra.

Iterativnom provjerom rasta brzine požarnih piksela može se aktivirati alarm. Osnovna ideja je da ako ekstrahirani požarni pikseli rastu s vremenom gorenja, tada će se vatra proširiti i trebao bi se oglasiti požarni alarm. Uzastopno ponavljanje  $m_{i+1} > m_i$  pokazuje da je to prava vatra. Neka  $R$  označava vremena  $m_{i+1} > m_i$ ,  $N$  označava vremena usporedbe  $m_i$  i  $m_{i+1}$ . Kada je vrijednost veća od 0.7, tada će se vatra proširiti, Kada je vrijednost veća od 0.9, požar je dosegao kritičnu fazu i potreban je hitan odgovor.

#### **A. Video detekcija požara temeljena na mješovitom Gaussovom modelu (engl. *mixture model*) i značajkama više boja**

Ovaj sustav za detekciju požara koristi i značajke boje i kretanja vatre. Predložena tehnika sastoji se od 2 koraka: detekcije pokretnih objekata i otkrivanja više boja. Na kraju se ta dva koraka kombiniraju kako bi se točno otkrila područja požara.

##### **1. Detekcija pokretnih objekata**

Vatra i dim su pokretni objekti, ali s druge strane postoji toliko mnogo pokretnih objekata nalik vatri. Ovdje se otkrivanje pokretnih objekata temelji na korištenju oduzimanja pozadine. Za izdvajanje pokretnih objekata koristi se mješoviti Gaussov model (GMM) [61] temeljen na oduzimanju pozadine. U GMM modelu vrijednost svakog piksela predstavljena je kao mješavina  $K$  Gaussovih distribucija. Svaka Gaussova distribucija koja je viša od praga klasificira se kao pozadinska, a druga Gaussova distribucija naziva se prednjom. Svaki piksel se provjerava s  $K$  Gaussovima distribucijama. Postoje 2 slučaja:

Prvi slučaj: piksel se podudara s  $K$  Gaussovom distribucijom. U ovoj situaciji, ako je Gaussova distribucija kategorizirana kao pozadina, tada je piksel kategoriziran kao pozadina, inače je piksel kategoriziran kao prednji plan.

Drugi slučaj: piksel se ne podudara s  $K$  Gaussovom distribucijom, tada je piksel kategoriziran kao prednji plan.

## 2. Otkrivanje više boja

Sljedeća faza je detekcija više boja pomoću RGB, HSI i YUV modela boja.

### a) Detekcija požara na temelju RGB modela boja

Iako ima mnogo boja vatre, vatra koja se razbuktava obično pokazuje crvenu do žutu boju. Povezana RGB vrijednost označena je kao  $R \geq G$  i  $G > B$ . Zbog jače R vrijednosti u slici požara, R bi trebao dati veću vrijednost od praga  $R_T$ . Iako uvjeti pozadinskog osvjetljenja mogu utjecati na zasićenost vatrom ili stvoriti pseudonime vatre što uzrokuje pogrešno otkrivanje. Stoga bi vrijednost zasićenja vatre trebala biti veća od praga. Ukoliko su postignuti uvjeti, odnosno zadovoljena su pravila (1), (2) i (3) RGB modela dolazi do izdvajanja požarnih piksela i praćenja dinamičkih značajki požara kako je objašnjeno.

### b) Detekcija požara na temelju HSI modela boja

HSI model boja predstavlja boju pomoću nijanse, zasićenosti i intenziteta. Vrijednost nijanse vatre od crvene do žute je u rasponu od 0 do 60. Pozadinsko osvjetljenje može utjecati na zasićenost vatre. Svjetlija područja imaju veću zasićenost od tamnih područja. To je zbog činjenice da je vatra jedina rasvjeta ako nema druge rasvjete. Stoga nijansa ima više bijele. Kako bi se osiguralo dovoljno osvjetljenja u obradi slike, vrijednost intenziteta treba biti viša od praga. Dolje su navedena tri pravila temeljena na HSI za izdvajanje piksela vatre iz slike:

$$\textit{Pravilo 1: } 0 \leq H \leq 60 \quad (4)$$

$$\textit{Pravilo 2: } 20 \leq S \leq 100 \quad (5)$$

$$\textit{Pravilo 3: } 100 \leq I \leq 255 \quad (6)$$

### 1. Detekcija požara temeljena na modelu boja YUV

YUV model boja predstavlja boju s 1 komponentom svjetline (Y) i 2 komponente boje (U), (V). Ovaj model boja otporan je na uvjete osvjetljenja i smanjuje utjecaj promjena osvjetljenja. Svjetlina bi trebala biti velika, a komponente boje manje. Dolje su navedena tri pravila temeljena na YUV-u za izdvajanje piksela vatre iz slike:

$$\textit{Pravilo 1: } Y \geq Y_T \quad (7)$$

$$\textit{Pravilo 2: } |U - 128| \leq U_T \quad (8)$$

$$\text{Pravilo 3: } |V - 128| \leq VT \quad (9)$$

YT, UT i VT su granične vrijednosti za Y, U i V.

Naposljetku, 3 pravila modela boja RGB, HSI i YUV kombiniraju se upotrebom operacije unije za stvaranje modela više boja, koji se zatim koristi na slici za izdvajanje piksela vatre, označenih kao  $Rcolor(i, j, n)$ .

$$Rboja = RRGB \cup RHSI \cup RYUV \quad (10)$$

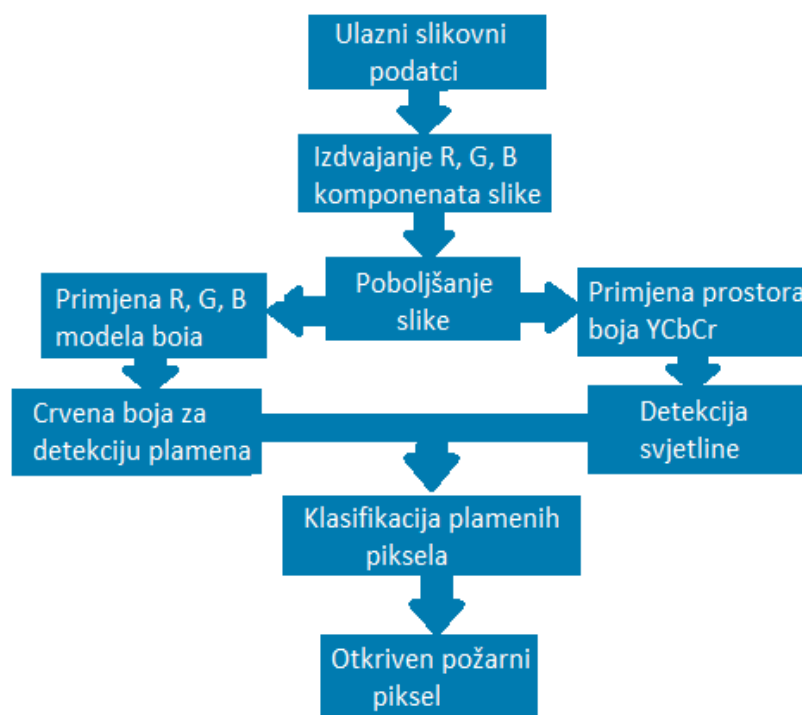
Korištenje otkrivanja pokretnih objekata ili otkrivanja više boja za otkrivanje požara može uzrokovati pogrešno alarmiranje požara. Stoga se uključuju rezultati GMM i detekcije više boja kako bi se dobili točni vatreni pikseli sa slike, označeni kao  $Rfire(i, j, n)$ . [1]

$$Rvatra(i, j, n) = Rpokret(i, j, n) \cap Rboja(i, j, n) \quad (11)$$

Problem s uobičajenim sensorima za vatru, dim, plamen i plin je kašnjenje u transportu. Da bi se pokrenuli, potrebno je vrijeme da čestice pogode točkaste senzore, pa je i ograničeno područje pokrivenosti još jedan problem. Stoga je za pokrivanje velikih područja potreban veliki broj točkastih senzora. Vatra ima nekoliko karakteristika, kao što su veličina, položaj, boja, rast, stupanj gorenja i dinamička tekstura [62]. Konvencionalni senzori ne mogu uhvatiti sve ove podatke, te je potrebna ljudska prisutnost kako bi utvrdili jesu li poslani pogrešne signali upozorenja. Ovi problemi mogu se uvelike smanjiti korištenjem kamera za prikupljanje fotografija požara i njihovom analizom. Kako bi se smanjio trošak, umjesto namjenske kamere za otkrivanje požara može se koristiti nadzorna kamera. Za otkrivanje požara koriste se IR i vidljive kamere.

U literaturi se može naći dosta primjena metode detekcije požara upotrebom kamera. U radu od Toreyina i sur. [63] plamen je detektiran infracrvenom termalnom kamerom, a skriveni Markovljev model korišten je za detekciju titranja plamena. Algoritam se zatim koristi za obradu ovih signala. Prva metoda temelji se na učenju i uključuje ekstrahiranje skupa podataka testnih fotografija požarišta i fotografija na kojima nema požara kako bi se poboljšao uređaj. To su algoritmi konvolucijskih neuronskih mreža. U drugoj metodi, boja, oblik, frekvencija treperenja i dinamička struktura vatre su značajni elementi.

Za detekciju plamena, Celik et al. [64] koristili su prostor boja YCbCr. Ovaj prostor boja učinkovito razlikuje svjetlinu od krominacije. Osnovni tok procesa za detekciju požarnog piksela iz izvorne slike pomoću RGB i YCbCr modela boja dan je na slici 10.



**Slika 10.** Dijagram toka za otkrivanje piksela požara pomoću RGB i YCbCr modela boja [6]

Samo informacije o boji nisu dovoljne za dobivanje pouzdanih rezultata; već je potrebno znati i kretanje vatre. U literaturi se navode različite tehnike za detekciju kretanja vatre poput metode oduzimanja pozadine, vremenske diferencijacije i analize optičkog toka [65]. Gunay i sur. [66] koristili su Markovljev model za razlikovanje gibanja plamena od drugih objekata boje slične bojama plamena, a vremensku *wavelet* analizu koristili su za otkrivanje granice plamena. Toreyin i sur. [67] su također koristili vremensku *wavelet* analizu, prostornu analizu i heurističke pragove za podatke o boji i kretanju za detekciju plamena. Sustav za detekciju plamena predložili su Habiboglu et al. [68], gdje mobilna kamera detektira pokretne piksele vatre bez uklanjanja pozadine. Ko i sur. [69] predložili su detekciju plamena korištenjem neizrazitih konačnih automata (engl. *Fuzzy finite automata*), a ovaj pristup uzima u obzir nepravilnost plamena. Wang i sur. [70] koristili su određivanje boje i vjerojatnosti kretanja za formiranje vektora značajki za detekciju plamena.

Druga je funkcija dinamička analiza teksture okvira slike. Ova funkcija može poboljšati preciznost uočavanja vatre, ali cijena računalne opreme je viša, a značajna faza u video detekciji požara je detekcija rubova. Dimitropoulos i sur. [71] koristili su analizu dinamičke teksture za otkrivanje plamena u videu. Qiu i sur. [72] predložili su algoritam plamenog ruba s koracima, kao što su Sobelov operator, podešavanje razine sive, izgladivanje, podešavanje i uklanjanje nevažnih rubova kako bi se dobili jednostavni rubovi. [6]

### 3.3.1.2. Nevizualna detekcija plamena

Zračenje koje plamen emitira ovisi o temperaturi plamena i vrsti izgorjelog goriva. Ultraljubičasti, vidljivi i infracrveni senzori dostupni su za detekciju plamena i kategorizirani na temelju njihovog spektra. Xu i sur. [73] dizajnirali su senzor plamena temeljen na tri fotonaponske ćelije. Tri fotoćelije testiraju spektralne pojaseve IR, vidljivog i UV zračenja. Zbog taloženja aerosola na staklu receptora, omjer lažno pozitivnih alarmiranja je povećan u UV senzorima plamena. UV senzori emitiraju iskre UV spektra koje služe kao upozorenje za prekid rada senzora. Pauchard i sur. [74] predložili su model uz pomoć UV senzora plamena za uklanjanje udara iskri. Jeftini bliski infracrveni fotodetektor za detekciju plamena opisali su Lacovo et al. [75] temeljen na tehnologiji koloidne kvantne točke koja koristi poluvodič PbS. Upotrijebljene su dvije SiC fotodiode, a za detekciju plamena korišten je odnos između varijacije temperature i varijacije oblika OH trake.

## 3.4. Mreže senzora

### Sustav ranog otkrivanja požara pomoću bežičnih mreža senzora

Za rano detektiranje požara može se koristiti sustav bežičnih mreža senzora (WSN). WSN mreže imaju veliku količinu senzora koji mjere okolišne parametre i prenose podatke baznoj stanici koristeći bežični medij. WSN se zbog svoje mogućnosti postavljanja, visoke fleksibilnosti i velike mogućnosti proširenja koristi za različite primjene kao što su daljinsko upravljanje, praćenje ciljeva, u vojsci, za vođenje nuklearnih reaktora, praćenje okoliša. WSN mreže se koriste za otkrivanje požara u šumama metodama detekcije plina CO<sub>2</sub> i praćenjem temperature.

Postoje dvije glavne WSN arhitekture:

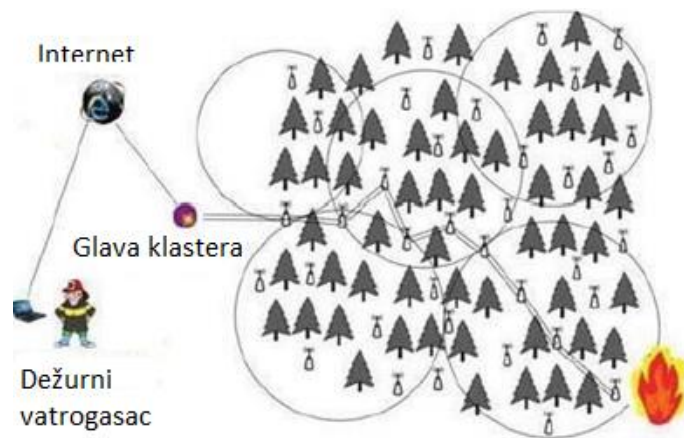
#### 1. Arhitektura ravne mreže

U arhitekturi ravne mreže senzorski čvorovi raspoređeni su u zadanom prostoru i svaki se čvor izravno dovodi do odredišta. Podaci se šalju skok po skok sve dok ne stignu do bazne stanice putem protokola usmjeravanja kao što je dinamički izvorni protokol usmjeravanja [76].

#### 2. Hijerarhijska mrežna arhitektura

U ovoj arhitekturi senzorski čvorovi su grupirani u klastere. Najjači senzor odabran je kao glava klastera, dok se preostali čvorovi nazivaju članovima klastera. Članovi klastera prenose prikupljene podatke u glavu klastera, koja zatim šalje podatke baznoj stanici. Ova

arhitektura koristi agregaciju podataka radi smanjenja broja prijenosa kombiniranjem podataka svih senzorskih čvorova. Hijerarhijska arhitektura je vrlo učinkovita i prikladna za velika područja.



**Slika 11.** Arhitektura sustava [1]

Slika 11 prikazuje arhitekturu sustava koji se sastoji od podsustava stabala, koji otkriva požar i prosljeđuje upozorenje nadležnima za šumarstvo.

**Podsustav za detekciju požara:** Svaki senzor u bežičnoj senzorskoj mreži (WSN) povremeno detektira vrijednosti CO<sub>2</sub> i temperature, zatim uspoređuje te vrijednosti s unaprijed određenim pragovima. Ako su vrijednosti temperature i CO<sub>2</sub> iznad praga, senzor šalje poruku upozorenja s GPS koordinatama senzorskih čvorova na odredište.

**Transportni podsustav:** Poruka upozorenja šalje se skok po skok dok ne stigne do odredišta koristeći protokol usmjeravanja kao što je *flooding*. U *floodingu*, kada senzorski čvor (node) otkrije podatke, ti se podaci emitiraju svim susjednim čvorovima. Taj se proces emitiranja nastavlja sve dok podaci ne stignu do odredišta. Bazna stanica prosljeđuje primljenu poruku upozorenja šumskim čuvarima kako bi poduzeli mjere za kontrolu požara.

**Lokalizacijski podsustav:** Za lokalizaciju požara, glava klastera treba imati svoje GPS koordinate, a preostali članovi klastera dobivaju svoje GPS koordinate od glave klastera. Stoga, pri raspršivanju glave klastera, prvo treba osigurati njezine GPS koordinate, a ostali članovi klastera dobivaju svoje GPS koordinate na temelju udaljenosti od položaja glave klastera. [1]

### 3.5. Metode dubokog učenja za detekciju požara

Metode dubokog učenja koriste se za rješavanje izazova u području digitalne obrade slike, kao što su kolorizacija slike, klasifikacija, segmentacija i detekcija, što su ključni aspekti

detekcije požara i dima. Tehnologija dubokog učenja uključuje nelinearnu i složenu transformaciju izdvojenih podataka. U literaturi se mogu naći brojni primjeri primjene dubokog učenja za detekciju požara.

Hong i sur. [77] predstavili su kombinaciju strojnog učenja i adaptivnog neizrazitog algoritma, s točnošću otkrivanja požara iznad 95%. Model sadrži pet konvolucijskih slojeva i jedan potpuno povezani sloj koji proučava dvije klase požarnih situacija i situacija upozorenja. Qin et al. [78] razvijaju modele klasificiranih slika požara korištenjem konvolucije i YOLOv3 za klasifikaciju ciljeva i regresiju položaja; točnost detekcije bila je 98% s brzinom detekcije od 38 sličica u sekundi. Koristeći velike skupove podataka o požarima za generiranje točnih predviđanja, Avazov et al. [79] razvili su poboljšani YOLOv4 algoritam koji otkriva čak i male iskre u različitim vremenskim uvjetima i oglašava alarm unutar 8 s od izbijanja požara. [6]

### **Detekcija požara temeljena na konvolucijskim neuronskim mrežama**

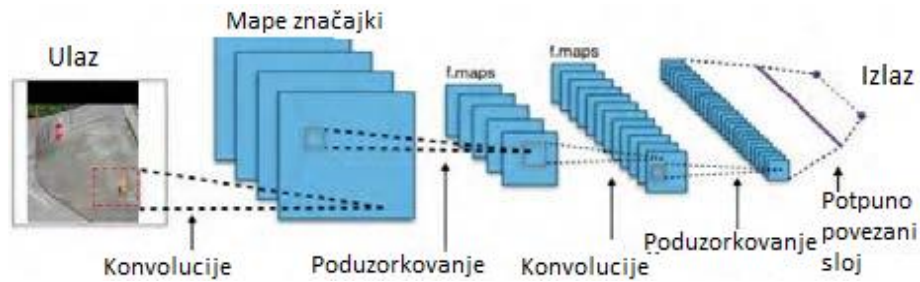
Konvolucijske neuronske mreže (CNN) se mogu koristiti za detekciju požara. Dok tradicionalne metode često generiraju lažne alarme, predložena CNN metoda smanjuje tu stopu, postizujući balans između računalne složenosti i točnosti detekcije požara.

CNN mreže se uglavnom koriste za klasifikaciju slika. Arhitektura CNN mreža, kako je prikazano na slici 12, osmišljena je za izdvajanje ključnih značajki iz slika. Proces učenja CNN mreža započinje konvolucijom poznate ulazne slike s nizom filtara, što rezultira stvaranjem mapa značajki. Zatim se primjenjuje ReLU aktivacijska funkcija radi povećanja nelinearnosti, te se provodi sloj udruživanja kako bi se smanjila dimenzionalnost. Nakon toga, mape značajki se izravnavaju u vektor koji se šalje u potpuno povezani sloj (FC) koji dalje klasificira sliku u različite klase - u ovom slučaju, požar i bez požara.

Ovaj CNN model se sastoji od 100 slojeva, uključujući 2 konvolucijska sloja, 4 sloja s maksimalnim udruživanjem, 1 sloj s prosječnim udruživanjem te 8 početnih slojeva. Tijekom procesa učenja, težine mreže se prilagođavaju algoritmom povratne propagacije. Nakon što se mreža obučila, nova slika se prosljeđuje kroz nju te se koriste značajke iz uvježbane slike za klasifikaciju ulazne slike.

CNN model ima niz prednosti, uključujući visoku točnost i relativno malu veličinu pogodnu za implementaciju na FPGA. Ova tehnologija predstavlja moćan alat za detekciju požara s potencijalom za široku primjenu. [1]





**Slika 12.** Klasična arhitektura CNN mreže [1]

### 3.6. Protupožarni robotski sustav

Sustavi za detekciju požara temeljeni na nepokretnim sensorima imaju svoja ograničenja. U teškim uvjetima, mobilni protupožarni senzori su sigurniji u usporedbi sa nepokretnim sensorima. Ta ograničenja mogu se prevladati uvođenjem senzora za požar na pokretnim robotima opremljenim aparatima za gašenje požara. Ti roboti mogu putovati po tlu ili letjeti kako bi otkrili i ugasilu vatru. Na ovaj način mogu se smanjiti rizici i opasnosti za vatrogasce. Različita istraživanja se provode s ciljem razvoja laganih robota kako bi se olakšao njihov let i kretanje po terenu.

Ando i suradnici [80] predstavili su koncept laganih robotskih zmajeva koji koriste vodene mlaznice kako bi se približili izvoru požara. Ovi zmajevi sadrže modul mlaznice i motore na vrhu za kontrolu putanje. Liljeback i kolege [81] razvili su vatrogasnog robota zmiju koji se temelji na hidraulici. Talijanski istraživači s Instituta za tehnologiju stvorili su robota za gašenje požara u obliku humanoida, koji može nositi do 10 kg tereta i podizati razne predmete [82]. Grupa Parosha dizajnirala je robotsko vozilo za gašenje požara opremljeno laserskim daljinomjerima, termovizijskim kamerama i sustavom za akustičnu detekciju [83]. Control Farayand Pasargad (CFP) proizveo je vatrogasnog robota potpomognutog turbinom s mogućnostima smanjenja dima, uklanjanja prepreka, daljinskog upravljanja i gašenja požara [84]. Howe i Howe Technology kreirali su robota Thermite RS1-T3 [85] koji koristi analognu kameru visoke razlučivosti i infracrvenu FTIR za prikupljanje podataka o požaru te ima sposobnost distribucije vode od 1250 GPM. Firemote je UGV vatrogasni robot razvijen od strane istraživačkog tima Ryland, koji upravlja i distribuira vodu i pjenu za gašenje požara u opasnim područjima. Archibot-m je vodootporan robotski vatrogasni uređaj koji proizvodi DRB Fate Ltd., sposoban za otkrivanje požara pomoću vizualne kamere, s posebnom učinkovitošću u operacijama gašenja požara u zatvorenim prostorima i penjanju po stepenicama [86]. Robot Brock, posebno dizajniran za rad u skućenim prostorima poput

penjanja po stepenicama, proizvodi tvrtka Brokk [87]. Glavni cilj tih vatrogasnih robota je gašenje požara, pri čemu koriste vodu, kemikalije, pjenu i CO<sub>2</sub>. [6]

### **Usporedba metoda detekcije požara**

Detekcija požara temeljena na sensorima dima i plina otporna je na promjene pozadine i šumove, što smanjuje rizik od lažnih alarma. Međutim, aktivacija alarma zahtijeva vrijeme, a ovi senzori nisu uvijek prikladni za vanjske prostore te ne pružaju informacije o lokaciji i veličini požara.

Detekcija požara putem WSN mreže nudi visoku fleksibilnost i proširivost te je pogodna za velika područja. Ipak, zahtijeva kompleksnu koordinaciju između senzorskih čvorova, složenija je za postavljanje od žične mreže i podložna je mogućnosti krađe podataka.

Detekcija požara na temelju obrade slike pruža brzu detekciju i isplativu opciju te informacije o mogućem širenju požara. No, ima poteškoća u razlikovanju prave vatre od drugih objekata te visoku stopu lažnih alarma.

Detekcija požara putem GMM modela i višebojnih modela nudi bolju učinkovitost i robusnost te sposobnost razlikovanja vatre od sličnih objekata. Ipak, ima visoku stopu lažnih alarma.

Detekcija požara na temelju CNN mreža ima manje lažnih alarma, visoku točnost i brz odgovor. No, zahtijeva veliku memoriju i dugotrajno vrijeme učenja mreže. Detekcija požara temeljena na CNN mrežama ima manje lažnih uzbuna, visoku točnost, zahtijeva manje ljudskog uplitanja, brz odgovor, a nedostaci su što zahtijevaju veliku memoriju i dugo vrijeme učenja mreže [1].

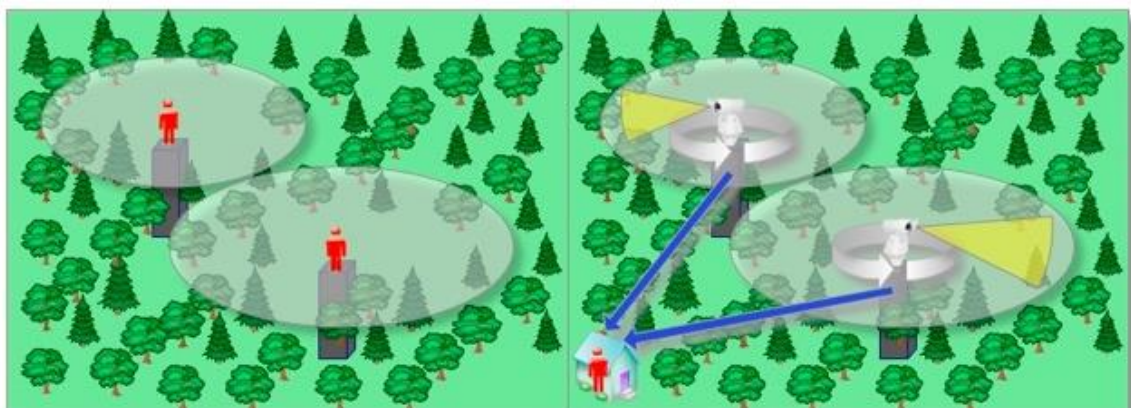
### **3.7. Video motrilačke jedinice**

Osim preventivnih protupožarnih mjera, jedini efikasni način smanjenja štete koju uzrokuju požari otvorenog prostora je pravovremeno uočavanje požara u njegovom nastajanju, te brza i odgovarajuća intervencija. Zbog toga se veliki naponi ulažu u rano otkrivanje požara koje se tradicionalno temelji na ljudskim osmatračima koji tijekom požarne sezone dežuraju 24 sata na osmatračkim lokacijama nastojeći uočiti svaki požar u nastajanju. Po našim zakonima i propisima organizacije koje skrbe o šumama, odnosno gradovi, općine i županije dužne su organizirati odgovarajuću osmatračko-motrilačku službu. Kod nas to najviše rade Hrvatske šume, a djelomično i DVD-ovi.

Ljudski osmatrači su obično opremljeni samo dalekozorima i sredstvima komunikacije, a posao osmatrača najčešće obavljaju priučeni sezonski radnici. Prema podacima Hrvatskih šuma prezentiranih na Međunarodnom savjetovanju Suzbijanje požara otvorenog prostora - nove metode i pristupi [88] u razdoblju od 1992 – 2007. g. samo Hrvatske šume prosječno godišnje za osmatračku protupožarnu službu ulože 22.086.646 kn, i još dodatno za izradu i održavanje osmatračnica 535.596 kn, što daje ukupno više od 3.000.000 EUR godišnje.

Ova se sredstva skoro u cijelosti troše na osmatračku službu temeljenu na ljudskim osmatračima, a s druge strane najveći broj požara otvorenog prostora u Republici Hrvatskoj nisu prijavili profesionalni osmatrači locirani na osmatračkim lokacijama, već građani i to najčešće putem mobilnih komunikacija. Problem kod dojava građana, ali i kod profesionalnih osmatrača, s obzirom da na osmatračnicama rade priučeni sezonski radnici, a ne obučeni vatrogasci, je u tome što je na temelju njihovih prijava vatrogasnom zapovjedniku vrlo teško sagledati stvarni razmjer požara i donijeti odluku o veličini potrebne intervencije. Pravovaljani opisi požarnih razmjera dobiju se tek dolaskom vatrogasaca na teren, čime se samo gubi vrijeme, a u gašenju požara otvorenog prostora vrijeme je jedan od najvažnijih faktora. Ovo nije samo problem Hrvatske, on se javlja i u ostalim zemljama pogođenim požarima otvorenog prostora, pa se 90-godina posebno potaknuto razvojem suvremenih informacijsko – komunikacijskih tehnologija počinju pojavljivati tehnologijski puno napredniji sustavi protupožarnog nadzora temeljeni na ljudskim osmatračima i daljinski upravljanim kamerama postavljenim na motrilačke lokacije. Osmatrač se sa motrilačke lokacije prebacuje u operativni centar, kako shematski prikazuje Slika 1, a uz to on više nije priučeni sezonski radnik, već obučeni vatrogasni osmatrač. Ovakvi sustavi imaju brojne prednosti kao što su:

- a) Jedan operater može nadzirati puno veće područje pokriveno s nekoliko daljinski upravljanih kamera postavljenim na motrilačke lokacije.
- b) Osim ranog uočavanja požara koje operater obavlja dok se kamera automatski okreće pokrivajući cijeli vidokrug motrilačke lokacije, ovakvi sustavi daju i vrlo važnu mogućnost daljinske video prisutnosti. Daljinski upravljane kamere obično su opremljene vrlo moćnim optičkim zumom (najčešće minimalno 22x povećanja), pa operater može dodatno provjeriti svako sumnjivo područje. Ovo je pogotovo značajno ako je postavljena mreža motrilačkih kamera tako da se svaka lokacija može sagledati sa više pozicija.
- c) Sustavi obično imaju i mogućnost pohrane snimaka ili video sekvenci, što je posebno značajno za naknadne analize.



**Slika 13.** Razlika između protupožarnog osmatranja temeljenog na ljudskim osmatračima i protupožarnog osmatranja temeljenog na daljinski upravljanim video kamerama [95]

Osnovni nedostatak ovakvog sustava je što je detekcija požara i dalje ovisna isključivo o operateru koji mora cijelo vrijeme gledati u ekrane ukoliko želi uočiti požar u nastajanju, što kao posljedicu ima zamor operatera koji teško može ostati koncentriran duže vremena. Upravo zbog toga javila se potreba za automatizacijom postupka prepoznavanja požara u nastajanju te se pristupilo nadogradnji sustava temeljenog na video kamerama postavljenim na motrilačkim lokacijama razvojem dodatnih modula za automatsko prepoznavanje požara. Kod ovakvih automatskih protupožarnih nadzornih sustava operater više ne treba neprestano gledati u ekrane, već sustav automatski analizira slike i tek ukoliko otkrije nešto sumnjivo podiže alarmni prozor i aktivira zvučni signal. Operater provjerava i donosi konačnu odluku da li se radi o požaru ili ne. Svojstvo daljinske video prisutnosti najčešće je i dalje zadržano kao vrlo važna osobina protupožarnih nadzornih sustava, štoviše najčešće je i dodatno unaprijeđeno različitim brzim načinima usmjeravanja i upravljanja kamerom, posebno uz pomoć integracije sustava s GIS-om (Geografski Informacijski Sustav). Ovakvi sustavi spadaju u grupu naprednih automatskih protupožarnih nadzornih i motrilačkih sustava, a njima pripada i hrvatski sustav IPNAS – Inteligentni Protupožarni Nadzorni Sustav.

### 3.8. Napredni automatski protupožarni nadzorni i motrilački sustavi

Razlikuju se automatski protupožarni detektorski sustavi i automatski protupožarni nadzorni i motrilački sustavi.

Automatski protupožarni detektorski sustavi imaju cilj rano detektirati požar i, kod naprednijih sustava, odrediti njegovu zemljopisnu lokaciju. Dijele se na satelitske i zemaljske sustave. Satelitski sustavi, poput kanadskog Fire M3 [89], europskog EUMETSAT FIR [90] i

NASA MODIS [91], pogodni su za nadzor većih, nenastanjenih područja, ali im nedostaje dobra prostorna i vremenska rezolucija te su neupotrebljivi za područja poput jadranske obale.

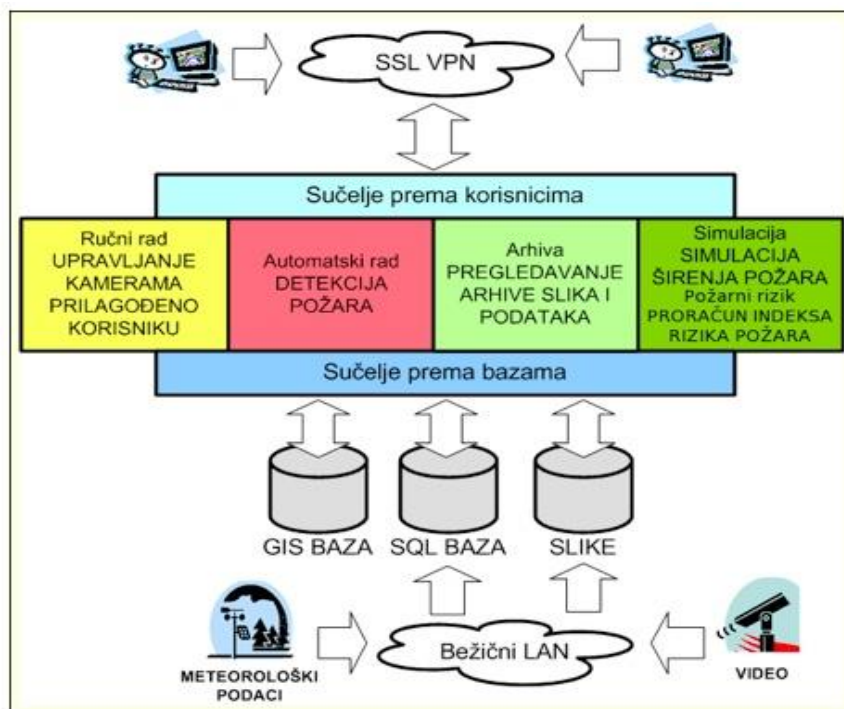
Zemaljski sustavi koriste različita osjetila na motrilačkim lokacijama, poput video kamera u vidljivom ili infracrvenom području, optičkih spektrometara, laserskih predajnika i prijemnika, te akustičkih i temperaturnih senzora. [92] Primjeri su njemački FireWatch [93] i portugalski Forest Fire Finder [94]. Nedostatak im je nemogućnost daljinske video prisutnosti, što je važno za vatrogasce. Ovaj se nedostatak ponekad rješava dodavanjem daljinski upravljanih kolor video kamera, ali to povisuje cijenu.

Napredniji sustavi koriste daljinski upravljane visoko osjetljive kamere koje rade u dvojnomo režimu rada: kao kolor kamere danju i crno-bijele kamere noću. Primjeri su južnoafrički FireHawk, kanadski ForestWatch, portugalski Cyclope, francuski UraFire i PRODALIS, turski TIS-VisiFire te hrvatski IPNAS (*iForestFire*). IPNAS je prepoznat kao jedan od najnaprednijih sustava i osvojio je 1. nagradu za najinovativniji hrvatski proizvod 2008. godine.

### **3.8.1. IPNAS – *Inteligentni protupožarni nadzorni sustav***

IPNAS je integralni i inteligentni protupožarni nadzorni sustav koji koristi video kamere u vidljivom i infracrvenom spektru. Detektira požare koristeći naprednu digitalnu obradu i analizu slike, prepoznajući dim danju i plamen noću. IPNAS funkcionira kao Web informacijski sustav, s korisničkim sučeljem u standardnom Web pregledniku. Sastoji se od terenskih motrilačkih jedinica s IP kamerama i meteorološkim stanicama koje se bežično povezuju s centralnim poslužiteljem, koji analizira i prikazuje podatke.

Sustav ima četiri moda rada: ručni, automatski, pregledavanje arhive i simulacijski rad. IPNAS koristi video informacije za detekciju požara, meteorološke podatke za smanjenje lažnih alarma i GIS podatke za geografsku analizu.



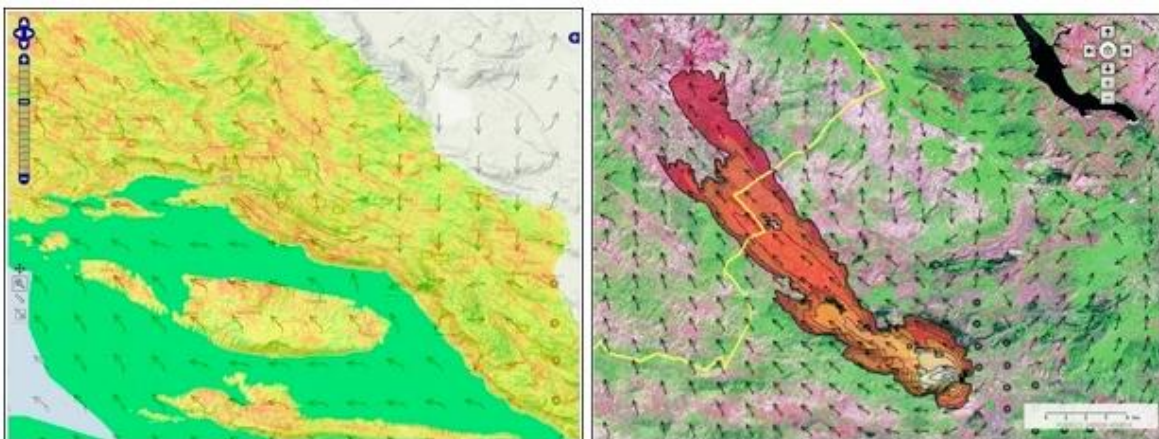
**Slika 14.** *Struktura Inteligentnog Protupožarnog Nadzornog Sustava IPNAS koji sadrži četiri načina rada, te se temelji na video informacijama, meteorološkim i GIS podacima [95]*

- a) Ručni rad je ručno upravljanje kamerom preko sučelja maksimalno prilagođenog korisniku koristeći upravljačku palicu, tastaturu, miša, virtualne komande, geo-referencirane mape, panoramske prikaze i slično.
- b) Automatski rad se temelji na automatskom okretanju kamere uz automatsko prepoznavanje pojave dima tijekom dana, odnosno pojave vatre preko noći koja rezultira u podizanju požarnog alarma kojeg operater može poništiti ili potvrditi.
- c) Pregledavanje arhive je način rada u kojem korisnik može pregledati sve pohranjene ulazne snimke, generirane alarme, meteorološke podatke ali i sve reakcije operatera vezane s paljenjem/gašenjem automatskog rada, promjenom osjetljivosti algoritma detekcije, promjeno maskiranih područja na slici i slično.
- d) Simulacijski mod je važan i u pred-požarnim aktivnostima kada se na temelju trenutnih meteoroloških podataka, karakteristika terena i vegetacije, te socioloških faktora računa trenutni dinamički mikrolokacijski indeks opasnosti od požara, a nakon izbijanja požara simulira se mogući budući razvoj požara. Simulator širenja požara je integrabilan i sa budućim sustavom za predviđanje širenja požara raslinja koji se nastoji u okviru konzorcija sastavljenog od više hrvatskih institucija razviti i postaviti u operativnu upotrebu na razini čitave Republike Hrvatske.





**Slika 15.** Ekran ručnog rada sustava IPNAS i primjer alarmnog prozora. Kamerom se ručno upravlja preko geo-referenciranih mapa, panoramskih prikaza, virtualnih komandi ili jednostavno klikom na mjesto na slici. U alarmnom prozoru prikazani su svi alarmi posljednjih pola sata. Na operateru je da ih klikom miša potvrdi ili poništi. [95]



**Slika 16.** Proračun mikrolokacijskog indeksa opasnosti od požara i simulacija širenja požara. Proračuni i simulacije se temelje na meteorološkim podacima, karakteristikama terena i vegetacije, ali i na sociološkim utjecajnim faktorima. [95]

IPNAS je integralni sustav zbog toga što se temelji na tri tipa podataka:

- a) Video informacije - Digitalni video signal se koristi u ručnom i u automatskom režimu rada sustava. U automatskom režimu rada iz video signala se izvlače pojedinačne slike na kojima se traže karakteristike požara otvorenog prostora. U ručnom režimu rada video signal služi za potrebe daljinske video prisutnosti i daljinskog video nadzora.

b) Meteorološki podaci - Meteorološki podaci se koriste u post-procesoru sustava za eliminaciju lažnih alarma, ali se isto tako mogu koristiti i za proračun indeksa opasnosti od šumskog požara za vrijeme pred-požarne, nadzorne faze ili za predviđanje putanje širenja požara za vrijeme požarne faze.

c) GIS (Geografski informacijski sustav) sadrži, ne samo zemljopisne informacije već i ostale informacije važne za požare otvorenog prostora kao što su požarna povijest, vegetacijske karakteristike, arhivirani meteorološki podaci i slično.

Inteligentni algoritmi prepoznaju požare, eliminiraju lažne alarme i koriste proširenu stvarnost za integraciju živih video slika s GIS informacijama. Modularnost sustava omogućava lako proširenje hardverskih i softverskih komponenti.



**Slika 17.** *Primjer korespondencije slike sa video kamere i 3D GIS sustava (u ovom slučaju Google Earth) sa eksperimentalne kamere Centra koja se nalazi na Zvezdanom selu Mosor. Ovo je preduvjet za primjenu metoda proširene stvarnosti. [95]*

### **Dosadašnja primjena sustava IPNAS**

IPNAS je razvijen kroz tehnološki projekt podržan od Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa, s eksperimentalnim periodom tijekom 2005. i 2006. godine u sklopu kojeg su instalirane tri motrilačke jedinice na brdu Marjan kraj Splita, Vidovoj gori na Braču i zgradi Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. Tijekom eksperimentalnog



perioda operativna baza sustava je bila u Vatrogasnom operativnom središtu DUZIS-a u Divuljama.

Nakon perioda testiranja, sustav je unaprijeđen uzimajući u obzir povratne informacije vatrogasnih operativaca. Primjedbe su se odnosile na potrebu za ručnim radom upravljanja kamerom, što je u početnoj verziji sustava bilo izostavljeno. Vatrogasni operativci naglasili su važnost kombinacije automatske detekcije i mogućnosti daljinske video prisutnosti na mjestu požara. To je dovelo do razvoja intuitivnijeg sučelja za ručno upravljanje kamerama, što je značajno poboljšalo korisničko iskustvo i operativnu učinkovitost.

Od 2006. godine kreće komercijalna ugradnja sustava IPNAS, najprije u Nacionalne parkove i Parkove prirode Republike Hrvatske. Sustav je od 2006. g. do 2008. g. ugrađen u NP Paklenica, NP Mljet, PP Vrana, PP Biokovo i PP Telašćica i do danas se uspješno koristi. Od 2008. godine krenulo se u razvoj kooperativnog protupožarnog nadzornog sustava temeljenog na mreži motrilačkih jedinica koje se međusobno nadopunjavaju na način da su posebno ugrožena područja vidljiva od strane više motrilačkih jedinica. Primjer realizacije takve mrežne verzije sustava IPNAS je Istarska županija u kojoj je postojeći sustav temeljen na ljudskim osmatračima i daljinski upravljanim kamerama od 2006. do 2009.g. nadograđen kooperativnom mrežnom verzijom sustava IPNAS.[95]

## 4. Copernicus program

Copernicus je program Europske unije namijenjen za promatranje Zemlje, odnosno našeg planeta i njegova okoliša, za krajnju dobrobit svih europskih građana. Programom Copernicus upravlja Europska komisija u suradnji s Europskom svemirskom agencijom (ESA), Europskim centrom za srednjoročne vremenske prognoze (ECMWF), Europskom organizacijom za eksploataciju meteoroloških satelita (EUMETSAT) i drugim partnerima. Copernicus program je uspostavljen kako bi pružao točne, pravovremene i lako dostupne informacije za poboljšanje upravljanja okolišem, razumijevanje i ublažavanje posljedica klimatskih promjena i osiguranje civilne sigurnosti.

Najvažnije komponente programa Copernicus su:

1. **Sentinel sateliti** dizajnirani za potrebe Copernicusa, kao što su:
  - *Sentinel-1*: Radar za promatranje Zemlje koji može raditi danju i noću, u svim vremenskim uvjetima.
  - *Sentinel-2*: Multispektralni instrument za praćenje promjena u zemljištu i vegetaciji.
  - *Sentinel-3*: Mjeri parametre poput temperature, boje i visine mora.
  - *Sentinel-4* i *Sentinel-5*: Geostacionarni i polarni sateliti za praćenje sastava atmosfere
  - *Sentinel-6*: Satelit za praćenje visine mora.
2. **In situ podatci**: Podatci prikupljeni s tla, mora i zraka uključujući mjerenja od meteoroloških stanica, plutača, letjelica i drugih izvora.
3. Tematski podijeljene **Copernicus usluge** koje prikupljaju, analiziraju i distribuiraju podatke iz satelitskih i *in situ* izvora:
  - **Kopnena usluga** (engl. *Land Service*): Praćenje korištenja zemljišta, vegetacije, vodnih resursa, itd.
  - **Morska usluga** (engl. *Marine Service*): Praćenje stanja mora i obalnih zona.
  - **Atmosferska usluga** (engl. *Atmosphere Service*): Praćenje kvalitete zraka i sastava atmosfere.
  - **Usluga za prilagodbu klimatskim promjenama** (engl. *Climate Change Service*): Podrška politikama za prilagodbu klimatskim promjenama.
  - **Usluga za upravljanje izvanrednim situacijama** (engl. *Emergency Management Service, EMS*): Podrška odgovorima na prirodne i tehnološke katastrofe.

- **Usluga za sigurnost** (engl. *Security Service*): Podrška sigurnosnim izazovima, kao što su granični nadzor, pomorska sigurnost i podrška vanjskim EU akcijama.

#### 4.3. Usluga za upravljanje izvanrednim situacijama (EMS)

Usluga za upravljanje izvanrednim situacijama (EMS) pruža pravovremene i točne geo-prostorne informacije ključnim akterima u upravljanju prirodnim katastrofama i hitnim situacijama uzrokovanim ljudskim djelovanjem. Ove informacije proizlaze iz satelitskog daljinskog istraživanja i dostupnih *in situ* ili otvorenih izvora podataka.

Sustav ima dva načina rada: *Rush mode* za hitne situacije koje zahtijevaju trenutni odgovor i *Non-rush mode* za aktivnosti upravljanja koje ne zahtijevaju trenutni odgovor, uključujući procjenu rizika prije katastrofe, ranjivost stanovništva i imovine, te oporavak i obnovu nakon katastrofe.

##### **Komponente Copernicus EMS usluge:**

###### 1. Komponenta mapiranja:

Pružuje karte temeljene na satelitskim snimkama s globalnom pokrivenošću. Usluga je dostupna od 1. travnja 2012., a implementira je Generalni direktorat Europske komisije za zajedničko istraživanje. Karte se mogu kombinirati s drugim podacima za geospacijalnu analizu i donošenje odluka.

###### 2. Komponenta ranog upozorenja:

Sastoji se od nekoliko sustava koji pružaju informacije o bitnim parametrima za različite tipove izvanrednih situacija:

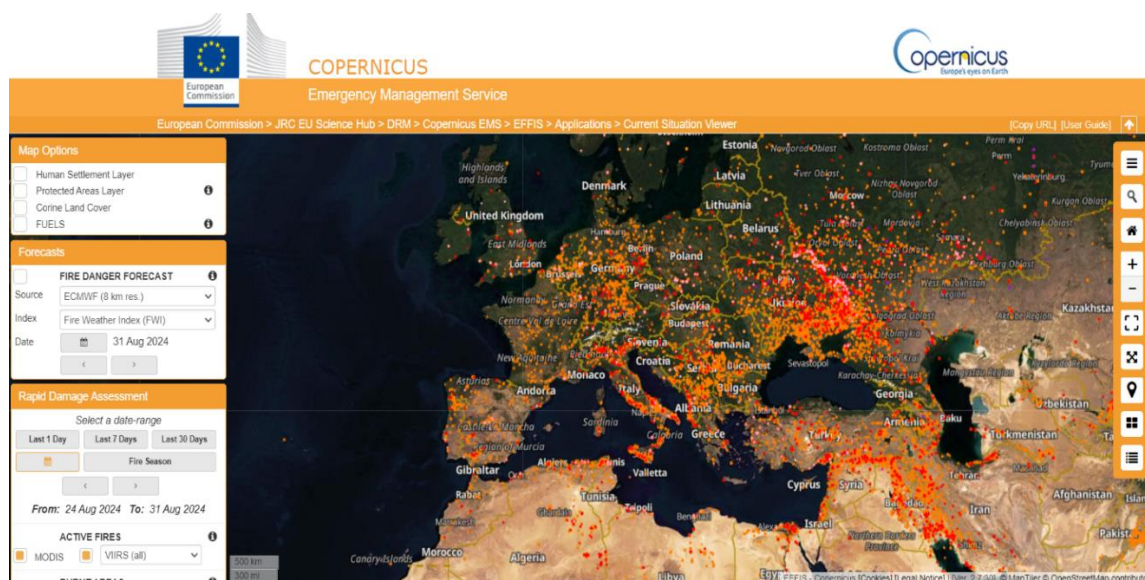
- Europski sustav svjesnosti o poplavama (EFAS): Pruža preglede tekućih i predviđenih poplava u Europi do 10 dana unaprijed.
- Europski informacijski sustav za šumske požare (EFFIS): Pruža informacije u stvarnom vremenu o šumskim požarima u Europi, Bliskom Istoku i Sjevernoj Africi.
- Europski opservatorij za sušu (EDO): Pruža informacije relevantne za sušu i rana upozorenja za Europu.
- Globalni sustavi: GloFAS, GWIS i GDO nadopunjuju navedene sustave na globalnoj razini. [96]

#### 4.4. Europski informacijski sustav za šumske požare (EFFIS)

Europski informacijski sustav o šumskim požarima podržava službe zadužene za zaštitu šuma od požara u EU i susjednim zemljama te pruža službama Europske komisije i Europskog parlamenta ažurirane i pouzdane informacije o šumskim požarima u Europi.

Trenutno se EFFIS stručna skupina za šumske požare sastoji od stručnjaka iz 43 zemlje Europe, Bliskog istoka i Sjeverne Afrike. 2015. godine EFFIS je postao jedna od komponenti Službe za upravljanje hitnim situacijama u programu EU Copernicus.

Kroz EFFIS je dostupno niz specifičnih aplikacija kao što su Preglednik trenutne situacije koji pruža najsvježije informacije o aktualnoj požarnoj situaciji u Europi i na području Sredozemlja. EFFIS uključuje današnje meteorološke karte opasnosti od požara i prognozu do 6 dana, dnevno ažurirane karte žarišta i područja požara.



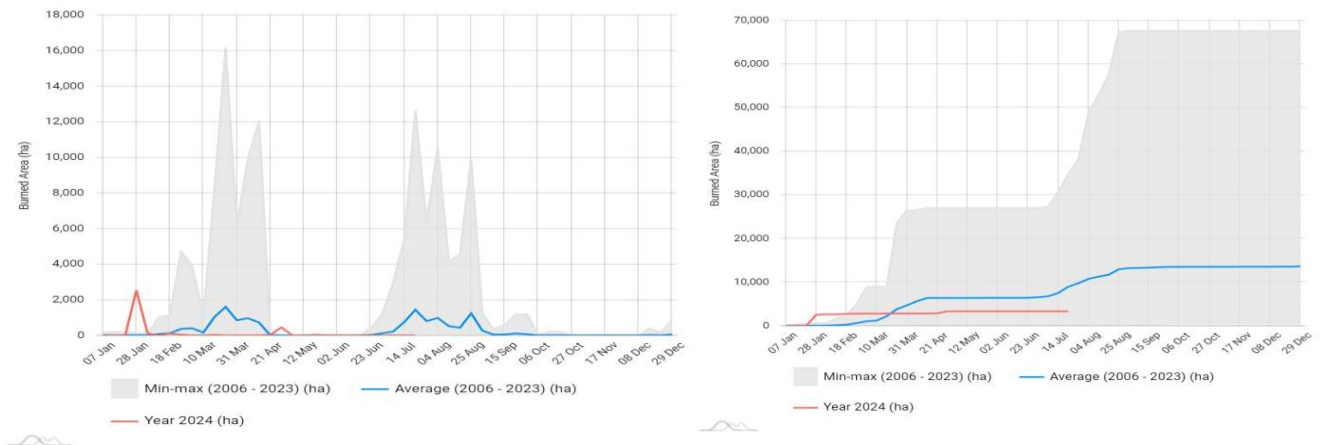
**Slika 18.** *Primjer sučelja EFFIS sustava za pregled trenutne situacije, razdoblje 24.08.2024. do 31.08.2024. [97]*

Još jedna specifična aplikacija EFFIS sustava je *Portal* čije se statističke informacije daju na nacionalnoj razini za EU, europske zemlje koje nisu članice EU te zemlje Bliskog istoka i Sjeverne Afrike.

Portal trenutne statistike pruža informacije o razvoju trenutne sezone požara kroz:

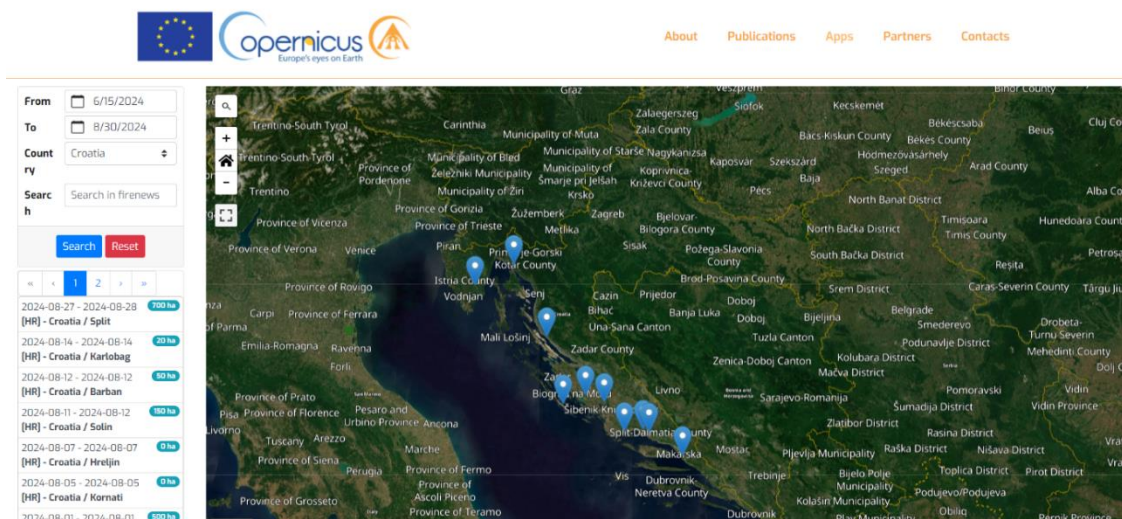
- 1) Trenutnu statistiku opožarenih površina i broja požara, u odnosu na prosjek zadnjih 14 godina.

- 2) Sezonski kumulativni trend opožarenih površina i broja požara u odnosu na prosjek zadnjih 14 godina.
- 3) Broj toplinskih anomalija koje je detektirao VIIRS senzor u usporedbi s prosjekom toplinskih anomalija za posljednjih 10 godina (2012.-2021.).
- 4) Broj toplinskih anomalija koje je detektirao MODIS senzor u usporedbi s prosjekom toplinskih anomalija za posljednjih 10 godina (2012.-2021.).



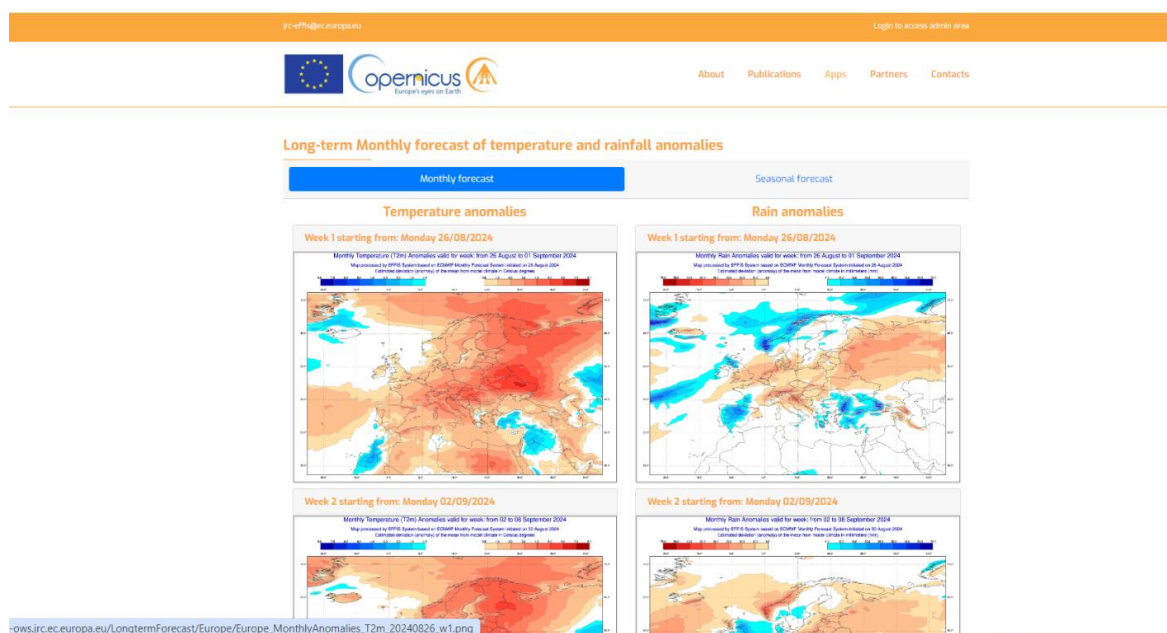
**Slika 19.** Sučelje Portala trenutne statistike sa statističkim podacima za Republiku Hrvatsku [97]

Iduća aplikacija sustava je *Požarne vijesti* (engl. *Firenews*). To je aplikacija koja prikuplja, geografski locira i pohranjuje u bazu podataka vijesti o požarima objavljene na internetu na svim jezicima EU i drugim jezicima.



**Slika 20.** Sučelje aplikacije Fire News sa aktualnim podacima o požarima u Hrvatskoj u razdoblju od 15.06.2024. do 30.08.2024. [97]

Nadalje, sustav pruža informacije kroz aplikaciju *Dugoročna vremenska prognoza za požare* koja daje mjesečne i sezonske prognoze temperaturnih i oborinskih anomalija za koje se očekuje da će prevladavati u europskim i mediteranskim područjima.



**Slika 21.** Sučelje aplikacije za praćenje dugoročne vremenske prognoze za požare [97]

Aplikacija *Preglednik rizika od šumskih požara* daje indeks rizika od šumskih požara za paneuropsku ljestvicu. Ovo uključuje dvije glavne skupine komponenti uzimajući u obzir opasnost od požara i ranjivost na tri kategorije: ljudi, ekološke i ekonomske vrijednosti izložene u ranjivim područjima. [97]





Slika 22. Sučelje aplikacije za pregled rizika od šumskih požara [97]

## 5. Zaključak

Otkrivanje požara je od presudne važnosti za zaštitu ljudi i imovine, jer omogućuje pravovremenu reakciju i smanjuje potencijalnu štetu koju požari mogu uzrokovati. Iako tradicionalni sustavi za detekciju požara, poput senzora dima, topline i plinova, pružaju pouzdanu osnovu za prepoznavanje požara, imaju svoja ograničenja. Ovi senzori često zahtijevaju neposrednu blizinu izvora požara kako bi se aktivirali, što može onemogućiti detekciju, osobito u ranim fazama požara kada je razina dima niska. Također, takvi sustavi često ovise o ljudskoj intervenciji za potvrdu nastanka požara, što može dodatno povećati vrijeme reakcije i smanjiti učinkovitost u kritičnim situacijama.

S druge strane, suvremeni pristupi, koji se temelje na vizualnim sensorima i naprednim algoritmima za obradu slike, nude potencijal za bržu i precizniju detekciju požara. Upotreba konvolucijskih neuronskih mreža (CNN) i drugih naprednih tehnika omogućuje sustavima prepoznavanje požara na temelju vizualnih značajki, poput boje i oblika plamena, te može smanjiti stopu lažnih alarma u usporedbi s tradicionalnim metodama. Ovi sustavi mogu detektirati požar u njegovim ranim fazama, čak i u situacijama kada su tradicionalni senzori neučinkoviti.

Međutim, i novi sustavi imaju svoje izazove. Potrebna je velika računalna snaga za obradu slike u stvarnom vremenu, kao i prilagodba algoritama kako bi se smanjila osjetljivost na vanjske čimbenike poput promjena osvjetljenja ili prisutnosti drugih pokretnih objekata. Nadalje, integracija ovih tehnologija s postojećim sustavima predstavlja logistički izazov, ali također otvara mogućnost za značajno unapređenje sposobnosti rane detekcije i smanjenje broja lažnih uzbuna.

U budućnosti, kombinacija tradicionalnih i suvremenih metoda mogla bi ponuditi najbolje rezultate, povećavajući ukupnu učinkovitost sustava za detekciju požara. Nastavak istraživanja i razvoja u ovom području može doprinijeti daljnjem smanjenju rizika i povećanju sigurnosti u zaštiti od požara.



## LITERATURA

- [1] Jasa Marin K, Amal S Kannan, Review on fire detection techniques, Department of Electronics and Communication Engineering, Government College of Engineering Kannur, 2021.
- [2] Juby Susan George, Julianne Elsa Thomas, Manuel George Thomas, Richie George Thomas, Remya S, Fire detection approaches for the modern world: A review, International Journal of Engineering Research & Technology, ICCIDT - 2021 Conference Proceedings
- [3] Hongda Tian, Wanqing Li, Lei Wang, and Philip Ogunbona. A novel video-based smoke detection method using image separation. In 2012 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 532–537. IEEE, 2012.
- [4] Anshul Gaur, Abhishek Singh, Ashok Kumar, Kishor S Kulkarni, Sayantani Lala, Kamal Kapoor, Vishal Srivastava, Anuj Kumar, and Subhas Chandra Mukhopadhyay. Fire sensing technologies: A review. *IEEE Sensors Journal*, 19(9):3191–3202, 2019.
- [5] Jevtić, R.B.; Blagojević, M.Đ. On a linear fire detection using coaxial cables *Therm. Sci.* 2014, 18, 603–614.
- [6] Fawad Khan, Zhiguang Xu, Junling Sun, Fazal Maula Khan, Adnan Ahmed and Yan Zhao, Recent advances in sensors for fire detection, MDPI, 26 travanj 2022
- [7] Barrias, A.; Casas, J.R.; Villalba, S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors* 2016, 16, 748.
- [8] Wang, A.; Liu, W.; Li, X.; Yue, C.; Wang, Y.; Wang, Q.; Cai, X. Distributed optical fiber temperature detecting and alarm system. In Proceedings of the 12th International Conference on Automatic Fire Detection, Gaithersburg, MD, USA, 25–28 March 2001.
- [9] Yilmaz, G.; Karlik, S.E. A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables. *Sens. Actuators A Phys.* 2006, 125, 148–155.
- [10] Meacham, B.J. International developments in fire sensor technology. *J. Fire Prot. Eng.* 1994, 6, 89–98.
- [11] Bao, X.; Brown, A.; DeMerchant, M.; Smith, J. Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short (<10-ns) pulses. *Opt. Lett.* 1999, 24, 510–512.
- [12] Liu, Z.; Ferrier, G.; Bao, X.; Zeng, X.; Yu, Q.; Kim, A.K. Brillouin scattering based distributed fiber optic temperature sensing for fire detection. *Fire Saf. Sci.* 2003, 7, 221–232.

- [13] Junwei, D.; Weiping, L.; Cui, T.; Xida, Y. Fire detector based on serial FBG temperature sensors optical cabling. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1550, 042054.
- [14] Wang, J.; Li, Z.; Fu, X.; Wang, H.; Jiang, D. Distributed temperature sensing system based on a densely spaced FBG array for small fire recognition. *Measurement* 2021, 179, 109406.
- [15] Hoff, H. Using Distributed Fibre Optic Sensors for Detecting Fires and Hot Rollers on Conveyor Belts. In *Proceedings of the 2017 2nd International Conference for Fibre-Optic and Photonic Sensors for Industrial and Safety Applications (OFSIS)*, Brisbane, Australia, 8–10 January 2017; pp. 70–76.
- [16] Ju, H.-M.; Huh, S.H.; Choi, S.-H.; Lee, H.-L. Structures of thermally and chemically reduced graphene. *Mater. Lett.* 2010, 64, 357–360.
- [17] Dominic P Mann, Keith FE Pratt, Themis Paraskeva, Ivan P Parkin, and David E Williams. Transition metal exchanged zeolite layers for selectivity enhancement of metal-oxide semiconductor gas sensors. *IEEE Sensors journal*, 7(4):551–556, 2007.
- [18] Mann, D.P.; Pratt, K.F.E.; Paraskeva, T.; Parkin, I.P.; Williams, D.E. Transition metal exchanged zeolite layers for selectivity enhancement of metal-oxide semiconductor gas sensors. *IEEE Sens. J.* 2007, 7, 551–556.
- [19] Naik, A.; Parkin, I.; Binions, R. Gas sensing studies of an NN hetero-junction array based on SnO<sub>2</sub> and ZnO composites. *Chemosensors* 2016, 4, 3.
- [20] Zhang, L.; Rahimabady, M.; Tan, S.Y.; Tan, C.Y.; Chen, S.; Chen, Y.F.; Yao, K.; Humbert, A.; Soccol, D.; Zang, K.; et al. P (VDF-HFP) polymer as sensing material for capacitive carbon dioxide sensors. *IEEE Sens. J.* 2017, 17, 4349–4356.
- [21] Riches, J.; Chapman, A.; Beardon, J. The Detection of Fire Precursors Using Chemical Sensors. In *Proceedings of the 8th International Fire Science and Engineering Conference*, Edinburgh, Scotland, 28 June–1 July 1999.
- [22] Mandayo, G.G.; Castano, E.; Gracia, F.J. Carbon monoxide detector fabricated on the basis of a tin oxide novel doping method. *IEEE Sens. J.* 2002, 2, 322–328.
- [23] Adib, M.; Eckstein, R.; Hernandez-Sosa, G.; Sommer, M.; Lemmer, U. SnO<sub>2</sub> nanowire-based aerosol jet printed electronic nose as fire detector. *IEEE Sens. J.* 2017, 18, 494–500.
- [24] Mirzaei, A.; Lee, J.-H.; Majhi, S.M.; Weber, M.; Bechelany, M.; Kim, H.W.; Kim, S.S. Resistive gas sensors based on metal-oxide nanowires. *J. Appl. Phys.* 2019, 126, 241102.

- [25] Ebnali-Heidari, M.; Koochi-Kamali, F.; Ebnali-Heidari, A.; Moravvej-Farshi, M.K.; Kuhlmei, B.T. Designing tunable microstructure spectroscopic gas sensor using optofluidic hollow-core photonic crystal fiber. *IEEE J. Quantum Electron.* 2014, 50, 1–8.
- [26] Dankner, Y.; Jacobson, E.; Goldenberg, E.; Pashin, S. Optical-Based UV-IR Gas Detector for Environmental Monitoring of Flammable Hydrocarbons and Toxic Gases. *Environ. Monit. Hazard. Waste Site Remediat.* 1995, 2504, 35–38.
- [27] Jabłonski, K.; Grychowski, T. The Method for Easy Identifying Zero Temperature Drift of Catalytic Bead Sensor. In *Proceedings of the 2018 XV International Scientific Conference on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE)*, Warsaw, Poland, 17–20 June 2018; pp. 1–4.
- [28] Leis, J.; Buttsworth, D. A robust method for tuning photoacoustic gas detectors. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 65, 4338–4346.
- [29] Zhang, C.; Yang, Y.; Tan, Y.; Ho, H.L.; Jin, W. All-optical fiber photoacoustic gas sensor with double resonant enhancement. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2018, 30, 1752–1755.
- [30] Gatsa, O.; Combette, P.; Rosenkrantz, E.; Fourmentel, D.; Destouches, C.; Ferrandis, J.-Y. High-temperature ultrasonic sensor for fission gas characterization in MTR harsh environment. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2018, 65, 2448–2455.
- [31] Yanzhen Tan, Congzhe Zhang, Wei Jin, Fan Yang, Hoi Lut Ho, and Jun Ma. Optical fiber photoacoustic gas sensor with graphene nano-mechanical resonator as the acoustic detector. *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, 23(2):199–209, 2016.
- [32] Shi, M.; Bermak, A.; Chandrasekaran, S.; Amira, A.; Brahim-Belhouari, S. A committee machine gas identification system based on dynamically reconfigurable FPGA. *IEEE Sens. J.* 2008, 8, 403–414.
- [33] Kumar, A.; Hancke, G.P. An energy-efficient smart comfort sensing system based on the IEEE 1451 standard for green buildings. *IEEE Sens. J.* 2014, 14, 4245–4252.
- [34] Serio, M.A.; Bonanno, A.S.; Newman, J.S. FT-IR Based System for Fire Detection. In *Proceedings of the NIST Annual Conference on Fire Research*, Gaithersburg, MD, USA, 17–20 October 1994.
- [35] Serio, M.A.; Bonanno, A.S.; Knight, K.S.; Newman, J.S. Fourier Transform Infrared Diagnostics for Improved Fire Detection Systems. In *Proceedings of the NIST Annual Conference on Fire Research*, Gaithersburg, MD, USA, 28–31 October 1996.

- [36] Perera, I.E.; Litton, C.D. A detailed study of the properties of smoke particles produced from both flaming and non-flaming combustion of common mine combustibles. *Fire Saf. Sci.* 2011, 10, 213–226.
- [37] Drysdale, D.D. Thermochemistry. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*; Springer: New York, NY, USA, 2016; pp. 138–150.
- [38] Bogue, R. Sensors for fire detection. *Sens. Rev.* 2013, 33, 99–103.
- [39] Vojtisek-Lom, M. Total diesel exhaust particulate length measurements using a modified household smoke alarm ionization chamber. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2011, 61, 126–134.
- [40] Brunner, C.; Peynot, T.; Vidal-Calleja, T. Combining Multiple Sensor Modalities for a Localisation Robust to Smoke. In *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA, 25–30 September 2011*; pp. 2489–2496.
- [41] Morgan, A. Left Luggage'-Automatic Fire Detection and the New Century. *Fire Eng. J.* 2000, 60, 37–39.
- [42] Liu, B.; Alvarez-Ossa, D.; Kherani, N.P.; Zukotynski, S.; Chen, K.P. Gamma-free smoke and particle detector using tritiated foils. *IEEE Sens. J.* 2007, 7, 917–918.
- [43] Bakhoun, E.G. High-sensitivity miniature smoke detector. *IEEE Sens. J.* 2012, 12, 3031–3035.
- [44] Aspey, R.A.; Brazier, K.J.; Spencer, J.W. Multiwavelength sensing of smoke using a polychromatic LED: Mie extinction characterization using HLS analysis. *IEEE Sens. J.* 2005, 5, 1050–1056.
- [45] Li, M.; Xu, W.; Xu, K.; Fan, J.; Hou, D. Review of fire detection technologies based on video image. *J. Theor. Appl. Inf. Technol.* 2013, 49, 700–707.
- [46] Alexander Filonenko, Danilo Cáceres Hernández, and Kang-Hyun Jo. Fast smoke detection for video surveillance using cuda. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(2):725–733, 2017.
- [47] Laarossi, I.; Quintela-Incera, M.Á.; López-Higuera, J.M. Comparative experimental study of a high-temperature raman-based distributed optical fiber sensor with different special fibers. *Sensors* 2019, 19, 574.
- [48] Gubbi, J.; Marusic, S.; Palaniswami, M. Smoke detection in video using wavelets and support vector machines. *Fire Saf. J.* 2009, 44, 1110–1115.

- [49] Ko, B.C.; Cheong, K.-H.; Nam, J.-Y. Fire detection based on vision sensor and support vector machines. *Fire Saf. J.* 2009, 44, 322–329.
- [50] Ko, B.; Cheong, K.-H.; Nam, J.-Y. Early fire detection algorithm based on irregular patterns of flames and hierarchical Bayesian Networks. *Fire Saf. J.* 2010, 45, 262–270.
- [51] Yuan, F. Video-based smoke detection with histogram sequence of LBP and LBPV pyramids. *Fire Saf. J.* 2011, 46, 132–139.
- [52] Qureshi, W.S.; Ekpanyapong, M.; Dailey, M.N.; Rinsurongkawong, S.; Malenichev, A.; Krasotkina, O. QuickBlaze: Early fire detection using a combined video processing approach. *Fire Technol.* 2016, 52, 1293–1317.
- [53] Yuan, F.; Fang, Z.; Wu, S.; Yang, Y.; Fang, Y. Real-time image smoke detection using staircase searching-based dual threshold AdaBoost and dynamic analysis. *IET Image Process.* 2015, 9, 849–856.
- [54] Li, P.; Zhao, W. Image fire detection algorithms based on convolutional neural networks. *Case Stud. Therm. Eng.* 2020, 19, 100625.
- [55] Muhammad, K.; Ahmad, J.; Baik, S.W. Early fire detection using convolutional neural networks during surveillance for effective disaster management. *Neurocomputing* 2018, 288, 30–42.
- [56] Khan, S.; Muhammad, K.; Hussain, T.; Del Ser, J.; Cuzzolin, F.; Bhattacharyya, S.; Akhtar, Z.; de Albuquerque, V.H.C. DeepSmoke: Deep learning model for smoke detection and segmentation in outdoor environments. *Expert Syst. Appl.* 2021, 182, 115125.
- [57] Parent, G.; Acem, Z.; Lechêne, S.; Boulet, P. Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire. *Int. J. Therm. Sci.* 2010, 49, 555–562.
- [58] Sidey, J.; Mastorakos, E.; Gordon, R.L. Simulations of autoignition and laminar premixed flames in methane/air mixtures diluted with hot products. *Combust. Sci. Technol.* 2014, 186, 453–465.
- [59] Chényu Chaoxia, Weiwei Shang, and Fei Zhang. Information- guided flame detection based on faster r-cnn. *IEEE Access*, 8:58923–58932, 2020.
- [60] Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, and Jian Sun. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. *arXiv preprint arXiv:1506.01497*, 2015.

- [61] Stauffer, C., Grimson, W.E.L., "Adaptive background mixture models for real-time tracking," In: Proceedings IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, 1999.
- [62] Prema, C.E.; Vinsley, S.S.; Suresh, S. Efficient flame detection based on static and dynamic texture analysis in forest fire detection. *Fire Technol.* 2018, 54, 255–288. [63] Töreyn, B.U.; Cinbis, R.G.; Dedeoglu, Y.; Cetin, A.E. Fire detection in infrared video using wavelet analysis. *Opt. Eng.* 2007, 46, 67204.
- [64] Celik, T.; Demirel, H. Fire detection in video sequences using a generic color model. *Fire Saf. J.* 2009, 44, 147–158.
- [65] Mueller, M.; Karasev, P.; Kolesov, I.; Tannenbaum, A. Optical flow estimation for flame detection in videos. *IEEE Trans. Image Processing* 2013, 22, 2786–2797.
- [66] Günay, O.; Taşdemir, K.; Töreyn, B.U.; Çetin, A.E. Fire detection in video using LMS based active learning. *Fire Technol.* 2010, 46, 551–577.
- [67] Töreyn, B.U.; Dedeoğlu, Y.; Güdükbay, U.; Cetin, A.E. Computer vision based method for real-time fire and flame detection.
- [68] Habiboğlu, Y.H.; Günay, O.; Çetin, A.E. Covariance matrix-based fire and flame detection method in video. *Mach. Vis. Appl.* 2012, 23, 1103–1113.
- [69] Ko, B.C.; Ham, S.J.; Nam, J.Y. Modeling and formalization of fuzzy finite automata for detection of irregular fire flames. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 2011, 21, 1903–1912.
- [70] Wang, D.; Cui, X.; Park, E.; Jin, C.; Kim, H. Adaptive flame detection using randomness testing and robust features. *Fire Saf. J.* 2013, 55, 116–125.
- [71] Dimitropoulos, K.; Barmoutis, P.; Grammalidis, N. Spatio-temporal flame modeling and dynamic texture analysis for automatic video-based fire detection. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 2014, 25, 339–351.
- [72] Qiu, T.; Yan, Y.; Lu, G. An autoadaptive edge-detection algorithm for flame and fire image processing. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2011, 61, 1486–1493.
- [73] Xu, L.; Yan, Y. A new flame monitor with triple photovoltaic cells. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2006, 55, 1416–1421.
- [74] Pauchard, A.R.; Manic, D.; Flanagan, A.; Besse, P.A.; Popovic, R.S. A method for spark rejection in ultraviolet flame detectors. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2000, 47, 168–174.

- [75] de Iacovo, A.; Venettacci, C.; Colace, L.; Scopa, L.; Foglia, S. PbS colloidal quantum dot visible-blind photodetector for early indoor fire detection. *IEEE Sens. J.* 2017, 17, 4454–4459.
- [76] D. B. Johnson and D. A. Maltz, “The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)”, IETF Internet draft, 19 July 2004, <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-10.txt>. (pristup: srpanj 2024.)
- [77] Park, J.H.; Lee, S.; Yun, S.; Kim, H.; Kim, W.-T. Dependable fire detection system with multifunctional artificial intelligence framework. *Sensors* 2019, 19, 2025.
- [78] Qin, Y.-Y.; Cao, J.-T.; Ji, X.-F. Fire detection method based on depthwise separable convolution and yolov3. *Int. J. Autom. Comput.* 2021, 18, 300–310.
- [79] Avazov, K.; Mukhiddinov, M.; Makhmudov, F.; Cho, Y.I. Fire Detection Method in Smart City Environments Using a Deep- Learning-Based Approach. *Electronics* 2021, 11, 73.
- [80] Ando, H.; Ambe, Y.; Ishii, A.; Konyo, M.; Tadakuma, K.; Maruyama, S.; Tadokoro, S. Aerial hose type robot by water jet for fire fighting. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2018, 3, 1128–1135.
- [81] Liljeback, P.; Stavadahl, O.; Beitnes, A. SnakeFighter-Development of a Water Hydraulic Fire Fighting Snake Robot. In *Proceedings of the 2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, 5–8 December 2006*; 1–6.
- [82] Ackerman, E.G.E. New WALK-MAN Robot Is Slimmer, Quicker, Better at Quenching Your Flames—IEEE Spectrum. *IEEE Spectrum*. : <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/new-version-of-walkman-is-slimmer-quicker-better-at-quenching-your-flames> (pristup: lipanj 2024.)
- [83] Fire Fighting UGV|Parosha Cheatah GOSAFER: <http://www.parosha-cheatah-gosafer.com/tasks/> (pristup: lipanj 2024.)
- [84] TAF20 Robot: Firefighting Robot: <https://robot.cfp.co.ir/en/newsdetail/106> (pristup: lipanj 2024.)
- [85] ThermiteTM|Howe & Howe Technologies: <https://www.howeandhowe.com/civil/thermite> (pristup: lipanj 2024.)
- [86] [http://www.drbfatec.com/html/01\\_business/business\\_0501.php](http://www.drbfatec.com/html/01_business/business_0501.php) (pristup: lipanj 2024.)
- [87] Products Archive—Brokk Global.: <https://www.brokk.com/product/> (pristup: lipanj 2024.)

- [88] Žaja, D., Uloga Hrvatskih šuma d.o.o. u borbi protiv požara otvorenog prostora, Međunarodno savjetovanje Suzbijanje požara otvorenog prostora - nove metode i pristupi, 8-11. prosinca 2008., Makarska
- [89] Fire Monitoring, Mapping, and Modeling (Fire M3), [http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/en\\_CA/background/summary/fm3](http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/en_CA/background/summary/fm3) (pristup: srpanj 2024.)
- [90] EUMETSAT Active Fire Monitoring (FIR), [http://www.eumetsat.int/Home/Main/Access\\_to\\_Data/Meteosat\\_Meteorological\\_Products/Product\\_List/SP\\_1145431848902?l=en](http://www.eumetsat.int/Home/Main/Access_to_Data/Meteosat_Meteorological_Products/Product_List/SP_1145431848902?l=en) (pristup: lipanj 2024)
- [91] MODIS Rapid Response System, <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/> (pristup: lipanj, 2024)
- [92] Stipaničev, D., Štula, M., Krstinić, D., Šerić, Lj., Jakovčević, T., Bugarić, M., Advanced automatic wildfire surveillance and monitoring network, 6th Int. Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal 15-18. Nov, 2010.
- [93] FireWatch, <http://www.fire-watch.de> (pristup: srpanj 2024.)
- [94] Forest Fire Finder NGNS IS, [http://www.ngns-is.com/html/florestas/fff\\_intro\\_eng.html](http://www.ngns-is.com/html/florestas/fff_intro_eng.html) (pristup: srpanj 2024.)
- [95] Darko Stipaničev, Maja Štula, Damir Krstinić, Ljiljana Šerić, Suvremeni sustavi za rano otkrivanje i praćenje požara raslinja mrežom naprednih video motrilačkih jedinica, Centar za istraživanje požara otvorenog prostora i Katedra za modeliranje i inteligentne računalne sustave, Sveučilište u Splitu Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
- [96] <https://emergency.copernicus.eu/> *Emergency Management Service* (pristup: srpanj, 2024)
- [97] <https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/> EFFIS (pristup: srpanj, 2024)