

# OPASNOSTI I MJERE ZAŠTITE OD POŽARA PRI INTERVENCIJAMA S UKLJUČENIM FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA

---

Trop, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:413666>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

# OPASNOSTI I MJERE ZAŠTITE OD POŽARA PRI INTERVENCIJAMA S UKLJUČENIM FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA

---

Trop, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:413666>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2023-02-10**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Mateo Trop

**OPASNOSTI I MJERE ZAŠTITE OD  
POŽARA PRI INTERVENCIJAMA S  
UKLJUČENIM FOTONAPONSKIM  
SUSTAVIMA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2022.

Karlovac University of Applied Sciences

Safety and Protection Department

Professional undergraduate of Safety and Protection

Mateo Trop

**HAZARDS AND MEASURES OF FIRE  
PROTECTION IN INTERVENTIONS WITH  
INCLUDED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

Final paper

Karlovac, 2022.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Mateo Trop

**OPASNOSTI I MJERE ZAŠTITE OD  
POŽARA PRI INTERVENCIJAMA S  
UKLJUČENIM FOTONAPONSKIM  
SUSTAVIMA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Filip Žugčić, mag. ing. el.

Karlovac, 2022.

## **PREDGOVOR**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći pritom znanje stečeno tijekom studija te literaturu koja je citirana i navedena u popisu literature. Zahvaljujem se svome mentoru Filipu Žugčiću, mag. ing. el. na utrošenom vremenu i savjetima tijekom pisanja završnog rada.

Posebno se želim zahvaliti obitelji, prijateljima i djevojci Anamariji na neizmjerne podršci i razumijevanju koje su mi pružali tijekom cijelog studiranja.

Mateo Trop

## SAŽETAK

Tržište fotonaponskih sustava posljednjih je godina doživjelo snažan rast što će se sigurno i u sljedećim godinama nastaviti. Upravo iz toga razloga industrija razvoja i proizvodnje sunčevih ćelija jedna je od najbrže rastućih sa sigurnom budućnosti.

Masovna primjena fotonaponskih sustava stvorila je i određene probleme, tipične za brzi razvoj koji nije praćen zakonima, tehničkim normama te pravilnicima. O tome nam govori nekoliko velikih požara u svijetu na obiteljskim kućama, zgradama, skladišnim prostorima gdje vatrogasci zbog prisutnih opasnosti nisu aktivno gasili požar već su pasivno štitili okolne objekte kako se isti ne bi proširio na njih.

Instalacija fotonaponskih sustava nosi dodatne nove opasnosti čak i u visoko razvijenim zemljama. Vatrogasne intervencije na mjestima gdje postoji fotonaponski sustav iziskuje od vatrogasaca poduzimanje dodatnih mjera zaštite u odnosu na sustav dobave električne energije iz javne mreže.

Analizom i proučavanjem kako strane literature tako i stvarnih intervencija dan je pregled koje su to dodatne opasnosti kod fotonaponskih sustava, te koje dodatne mjere zaštite je potrebno poduzeti kod takvog tipa intervencije.

Ključne riječi: fotonaponski sustav, opasnosti, mjere zaštite, požar

## **SUMMARY**

The market of photovoltaic system has experienced strong growth in recent years, which will certainly continue in next years. Reason for this is that the development of the industry and the production of solar cells is one of the fastest growing with guaranteed future. The widespread use of photovoltaic systems has also created certain problems, typical of rapid development that is not accompanied by laws, technical norms and regulations. Several large fires in the world tell us about this in family houses, buildings and warehouses where firefighters didn't actively extinguish the fire due to the present dangers, but passively protected the surrounding building so that it wouldn't spread to them.

The installation of photovoltaic systems carries additional new dangers even in highly developed countries. Firefighting interventions in places where there is photovoltaic require firefighters to take additional protection measures in relation to the system of electricity supply from the public network.

The analysis and study of both foreign literature and actual interventions provide an overview of the additional dangers of photovoltaic systems, and what additional protection measures need to be taken in this type of intervention.

Key words: photovoltaic systems, hazards. protection measures, fire



# SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| ZAVRŠNI ZADATAK .....   | I   |
| PREDGOVOR.....  | I   |
| SAŽETAK.....  | II  |
| SUMMARY.....  | III |
| SADRŽAJ.....  | IV  |
| 1. UVOD .....   | 1   |
| 2. OPĆA NAČELA O FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA.....                 | 2   |
| 2.1. Fotonaponski efekt .....                                 | 2   |
| 2.2. Elementi fotonaponskog sustava.....                      | 3   |
| 2.2.1. Fotonaponske ćelije .....                              | 4   |
| 2.2.2. Fotonaponski moduli i paneli.....                      | 4   |
| 2.2.3. Izmjenjivači.....                                      | 6   |
| 2.3. Vrste fotonaponskih sustava.....                         | 7   |
| 2.3.1. Samostalni fotonaponski sustavi .....                  | 7   |
| 2.3.2. Hibridni fotonaponski sustavi.....                     | 8   |
| 2.3.3. Mrežni fotonaponski sustavi .....                      | 9   |
| 3. PRIMJERI POŽARA OBJEKATA S FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA ...     | 11  |
| 4. OPASNOSTI OD FOTONAPONSKIH SUSTAVA ZA VATROGASCE.....      | 13  |
| 5. MJERE ZAŠTITE OD POŽARA ZA FOTONAPONSKE SUSTAVE .....      | 21  |
| 5.1. Mjere zaštite od požara prilikom projektiranja.....      | 21  |
| 5.2. Prekidač greške na uzemljenju.....                       | 23  |
| 5.3. Prekidač električnog luka.....                           | 23  |
| 5.4. Sklopka za brzo isključivanje (vatrogasni prekidač)..... | 24  |
| 6. ZAKLJUČAK.....   | 28  |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 7. LITERATURA.....       | 29 |
| 8. PRILOZI.....          | 30 |
| 8.1. Popis slika .....   | 30 |
| 8.2. Popis tablica ..... | 31 |

## 1. UVOD

Komponente fotonaponskih sustava prolaze zahtjevna ispitivanja sigurnosti i pouzdanosti tijekom proizvodnje te moraju zadovoljavati utvrđene norme i standarde. Ovi sustavi ne predstavljaju rizik po zdravlje, sigurnost ili okoliš u normalnim radnim uvjetima ako ih se pravilno postavi i održava.

Međutim, sve većom primjenom fotonaponskih sustava u svijetu postaje sve važnije razvijati postupke i educirati se o sigurnom upravljanju i smanjenju rizika u izvanrednim okolnostima u kojima se mogu naći fotonaponski sustavi. Ove izvanredne okolnosti uključuju vatrogasne intervencije u kojima vatrogasci mogu naići na fotonaponski sustav koji je možda neispravno postavljen ili je oštećen.

U izvanrednim okolnostima, ako požar započne u području fotonaponskog sustava, tijekom intervencije gašenja požara možda će se morati prilagoditi kako bi se uzela u obzir prisutnost fotonaponskog sustava i dodatne opasnosti koje isti nosi. Te dodatne opasnosti za vatrogasce odnose se na strujne udare, klizanje i padove, urušavanje dijelova konstrukcije, električne lukove i opasne produkte izgaranja materijala fotonaponskih sustava.

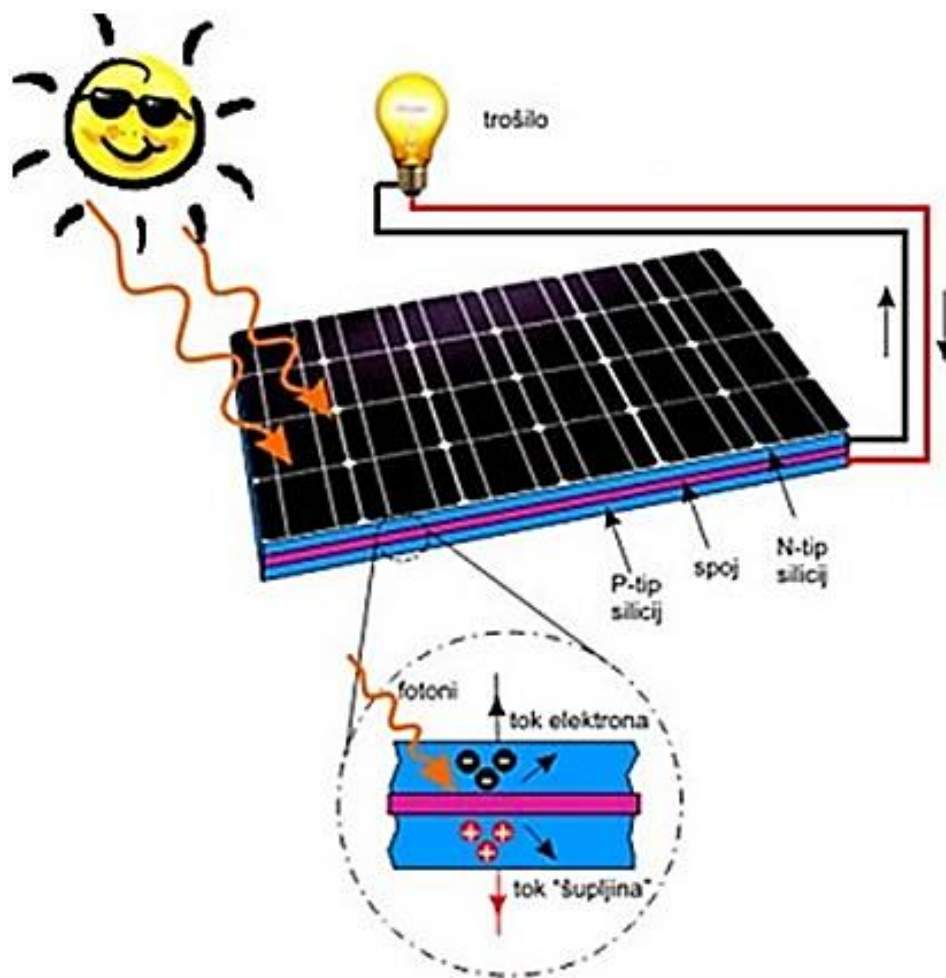
Kako bi se povećala sigurnost, buduće nove tehnologije za smanjenje opasnosti i ublažavanje posljedica moraju se pokazati učinkovitima. Standardizacijom koja osigurava da su fotonaponski sustavi pouzdani i sigurni za korištenje cijelog svog vijeka trajanja pokušava se rizik od nezgode svesti na najmanju moguću mjeru. Međunarodna suradnja između inženjera, vatrogasaca, tehnologa i ostalih je ključna za sigurnu implementaciju fotonaponskih sustava [1].

## **2. OPĆA NAČELA O FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA**

### **2.1. Fotonaponski efekt**

Godine 1839. francuski eksperimentalni fizičar po imenu Edmund Becquerel otkrio je da izlaganje određenih materijala danjem svjetlu proizvodi slabu električnu struju [2]. Nazvao je taj fenomen fotonaponski efekt. Fotonaponski efekt je osnovni proces u kojemu solarna ćelija pretvara energiju sunčeva zračenja u električnu energiju.

Foton je osnovni dio energije elektromagnetskog zračenja koji je posrednik u prenošenju elektromagnetskog međudjelovanja. Apsorpcijom fotona u fotonaponsku ćeliju, koja se sastoji od poluvodičkog materijala kao što je silicij ili platina, energija fotona prebacuje se na elektron u atomu solarne ćelije. Tako nabijeni elektron može raskinuti svoju vezu sa atomom i pri tome stvoriti električnu struju. Na mjestu gdje je bio elektron tada nastaje „šupljina“. U kombinaciji s P-N spojem, koji je sloj unutar fotonaponske ćelije koji nastaje spajanjem poluvodiča P-tipa i N-tipa koji stvaraju električno polje, „šupljine“ se kreću u suprotnom smjeru od elektrona, stvarajući tako električnu struju.



Slika 1. Osnovna građa fotonaponske ćelije [3]

## 2.2. Elementi fotonaponskog sustava

Svaki fotonaponski sustav sastoji se od različitih elemenata iako je princip rada za svaki sustav isti, efikasnost i pogodnosti ovise od načina na koji je sustav primijenjen. Osnovni element svakog fotonaponskog sustava je fotonaponska ćelija uz koju mogu biti prisutne i druge komponente kao što su: regulatori, izmjenjivači, konstrukcije itd.

### 2.2.1. Fotonaponske ćelije

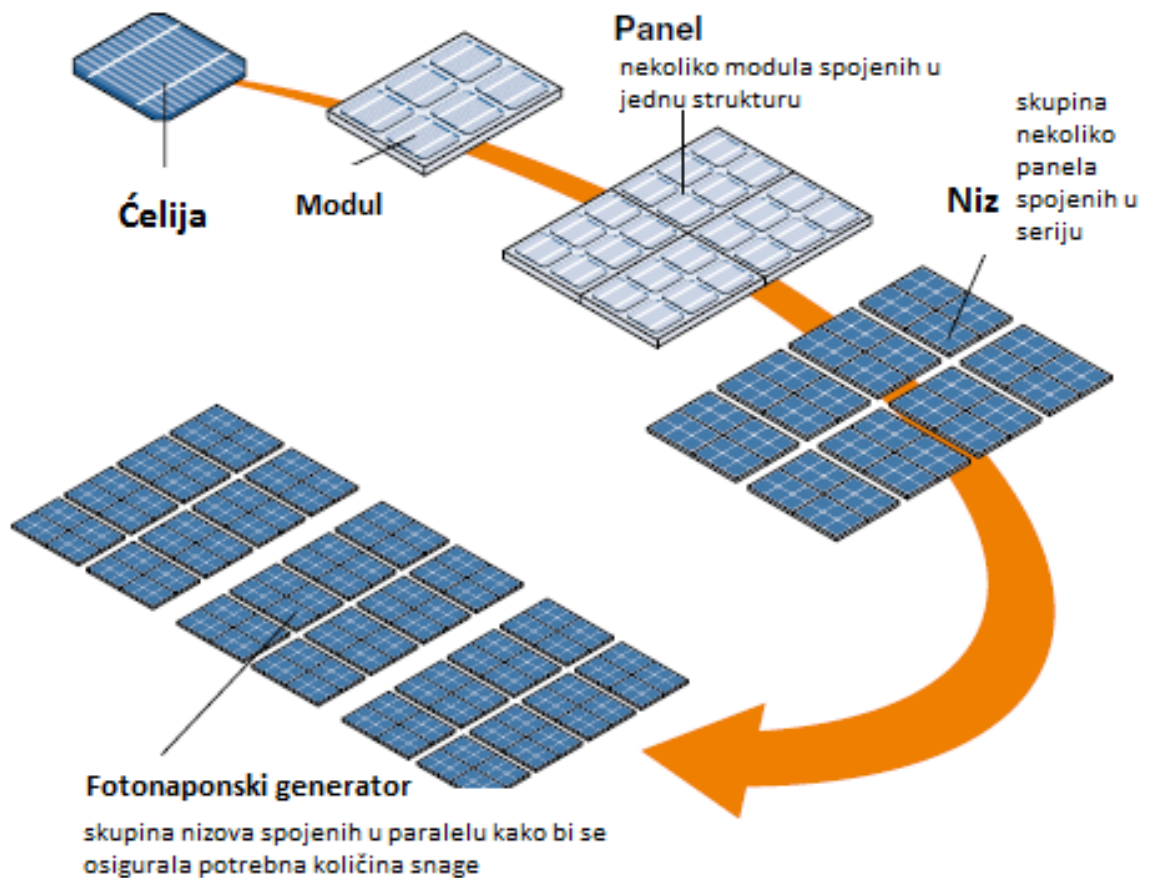
Fotonaponska ćelija je poluvodički uređaj koji izravno pretvara solarnu energiju u električnu energiju na osnovu fotonaponskog efekta [4]. Grupe fotonaponskih ćelija formiraju solarne module.



Slika 2. Fotonaponska ćelija [5]

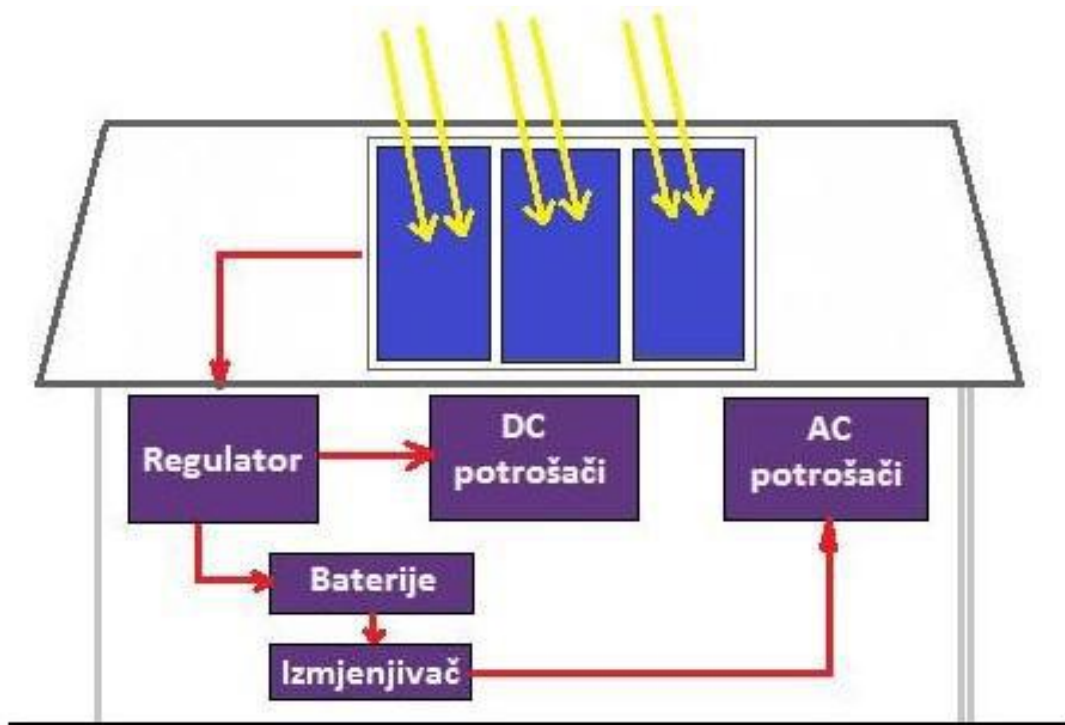
### 2.2.2. Fotonaponski moduli i paneli

Fotonaponska ćelija je obično vrlo mala i proizvodi oko 1-2W energije. Kako bi se dobila veća izlazna snaga fotonaponske ćelije grupiraju se u veće jedinice koje nazivamo moduli. Kako izlazna snaga još uvijek nije dostatna, solarne module možemo povezati u jednu strukturu koja zatim čini fotonaponski panel kakav danas najčešće susrećemo.



Slika 3. Fotonaponski sustav [6]

Pored fotonaponskih panela koji čine osnovu fotonaponskog sustava postoje i druge komponente i uređaji koji čine fotonaponski sustav kao što su uređaji za električno povezivanje, opremu za montiranje, uređaje za automatsko upravljanje, te baterije za skladištenje električne energije kada nema sunčeve svjetlosti.



Slika 4. Elementi fotonaponskog sustava [6]

### 2.2.3. Izmjenjivači

Izmjenjivač je električni uređaj koji pretvara istosmjernu struju dobivenu iz fotonaponskog panela u izmjeničnu struju, te je potom šalje u mrežu ili potrošačima. Ovisno o vrsti fotonaponskog sustava dijelimo ih na uređaje spojene na mrežni sustav i uređaje spojene na samostalni fotonaponski sustav [4].





Slika 5. Izmjenjivač DC/AC s automatskim uključenjem/isključenjem [7]

### **2.3. Vrste fotonaponskih sustava**

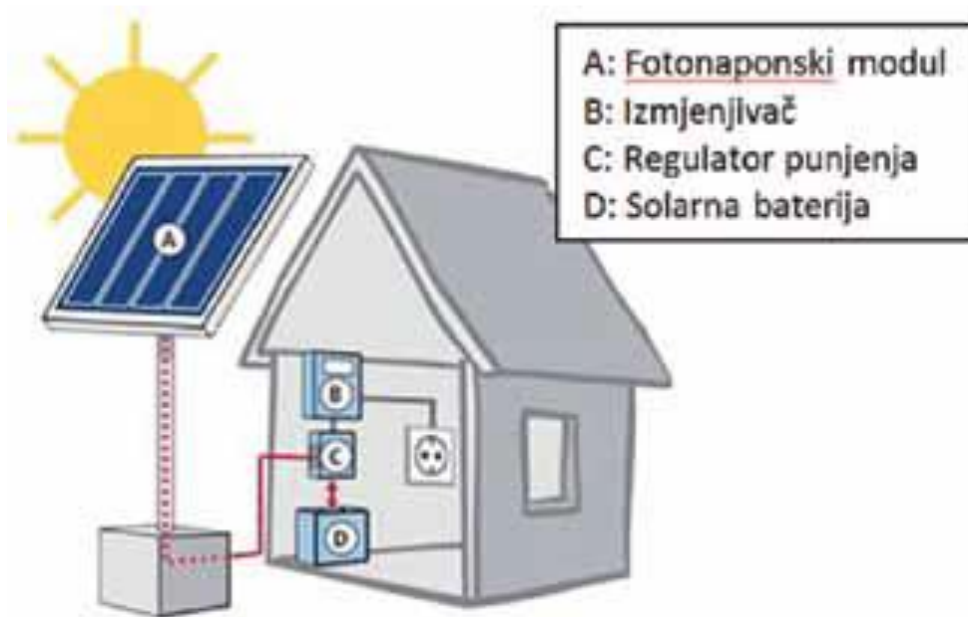
Fotonaponski sustav je skup fotonaponskih panela i ostalih uređaja koji na određeni način opskrbljuju potrošače električnom energijom dobivenom iz sunčeva zračenja. Tako proizvedenu energiju možemo odmah trošiti, skladištiti u baterije i prenositi u elektroenergetsku mrežu [8]. S obzirom kako se iskorištava tako proizvedena energija fotonaponske sustave možemo podijeliti na 3 vrste:

1. Samostalni fotonaponski sustavi
2. Hibridni fotonaponski sustavi
3. Mrežni fotonaponski sustavi

#### **2.3.1. Samostalni fotonaponski sustavi**

Samostalni fotonaponski sustavi su sustavi koji nisu priključeni na elektroenergetsku mrežu. To su jednostavni sustavi koji se sastoje od fotonaponskih panela i sustava za pohranu energije. Kako je struja proizvedena u takvom sustavu istosmjerna, ukoliko postoji potreba za izmjeničnom strujom potrebno je u sustav ugraditi izmjenjivač. Samostalni fotonaponski sustavi pogodni su za mjesta gdje elektroenergetska mreža nije prisutna, te zbog svoje

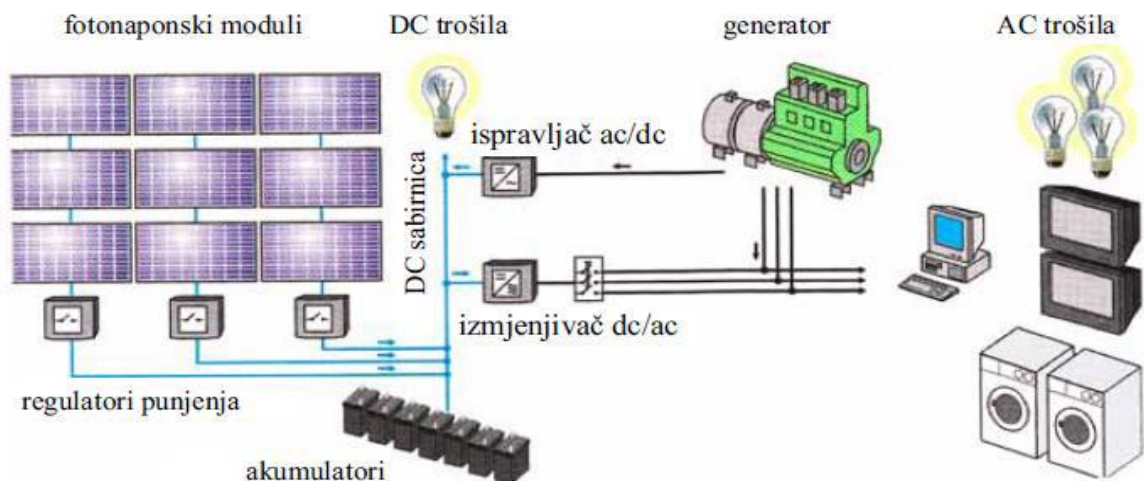
jednostavnosti su povoljni te imaju široki spektar primjene [8]. Koriste se za napajanje: sustava rasvjete, svjetlećih reklama, pumpnih sustava itd.



Slika 6. Samostalni fotonaponski sustav [9]

### 2.3.2. Hibridni fotonaponski sustavi

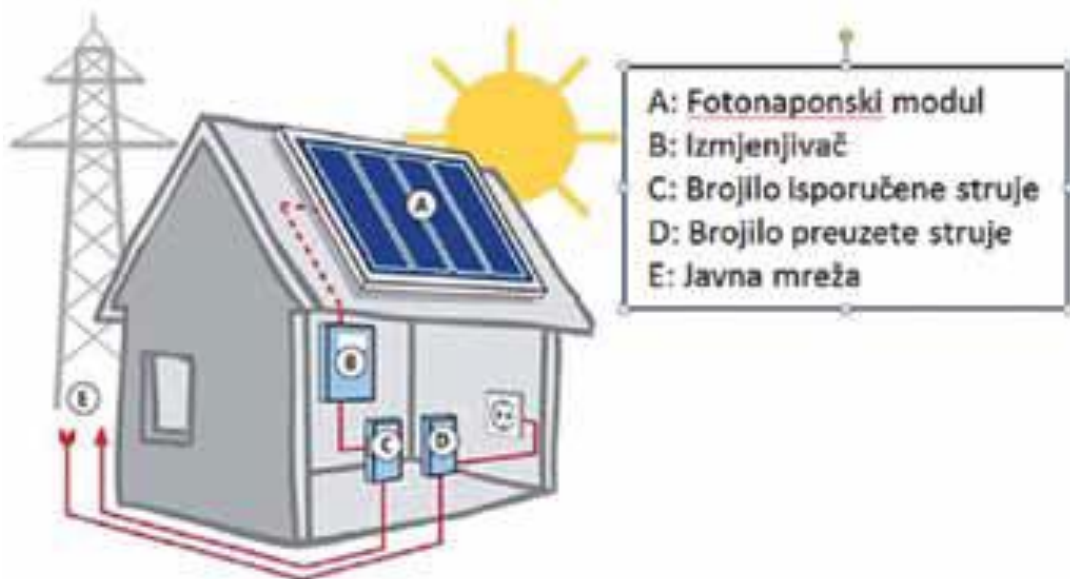
Hibridni fotonaponski sustavi su oni sustavi gdje se pored energije proizvedene u fotonaponskom sustavu koriste i drugi izvori energije kao što su: vjetroagregati, kogeneracije, gorivi članci ili strujni generator [10]. U takvim sustavima glavni izvor energije potrošačima su fotonaponski paneli dok se višak energije skladišti u baterijama. Budući da ovakav tip proizvodnje energije ovisi o vremenskim prilikama, nedostatak energije crpi se iz baterija. U slučaju da niti baterija ne može snabdjeti trošila, glavni izvor energije postat će strujni generator.



Slika 7. Hibridni fotonaponski sustav sa strujnim generatorom [10]

### 2.3.3. Mrežni fotonaponski sustavi

Mrežni fotonaponski sustavi koriste energiju iz elektroenergetske mreže za vrijeme kada fotonaponski sustav ne može osigurati potrošačima dovoljnu količinu energije. U slučaju kada fotonaponski sustav proizvodi više energije nego što je potrošačima potrebno, višak energije se predaje u elektroenergetsku mrežu što dovodi do toga kako nam nije potrebna baterija za pohranu viška energije [10].



Slika 8. Mrežni fotonaponski sustavi [9]

### 3. PRIMJERI POŽARA OBJEKATA S FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA

Iako rijetko, postoje slučajevi požara koji uključuju fotonaponske sustava u zemljama kao što su Sjedinjene Američke Države, Njemačka i Japan [11]. U slučajevima gdje fotonaponski sustav nije uzročnik požara, on je i dalje imao utjecaj ograničavajući rad vatrogascima. U rijetkim slučajevima gdje je fotonaponski sustav uzrok požara, izvor zapaljenja su električni lukovi, kvarovi na uzemljenju, te kvarovi na diodama.

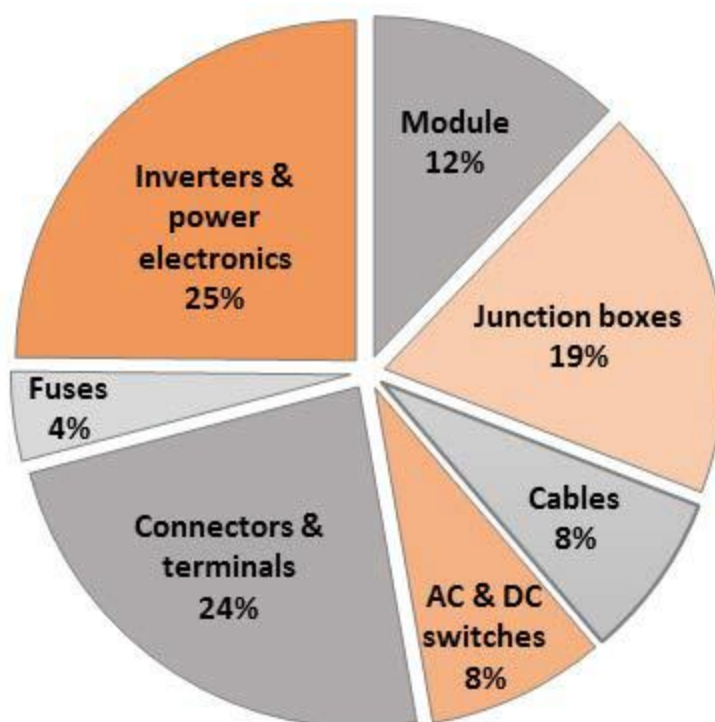
U tablici 1. su primjeri požara na objektima koji uključuju fotonaponski sustav. Fotonaponski sustav može ograničiti rad vatrogasaca zbog povećane opasnosti od padova, strujnih udara i urušavanja krovnih konstrukcija. U prošlosti je nedostatak standardnih operativnih postupaka prilikom gašenja požara objekata koji uključuju fotonaponske sustave dovodio do slučajeva nesigurnosti u pogledu načina na koji vatrogasci pristupaju gašenju požara, što je dovelo do pasivnog gašenja požara u kojima su objekti u potpunosti izgorjeli.

Tablica 1. Primjeri požara na objektima koji uključuju fotonaponske sustave [11]

| Lokacija   | Objekt  | Šteta   | Ograničenja u radu   |
|--|---|---|--|
| Bakersfield, CA,<br>United States<br>Travanj 2009. | Velika prodavaonica,<br>380kW moduli na krovu | Požar se nije proširio kroz metalne krovne ploče      | - Dva odvojena požara izbila su zbog kvara na uzemljenju<br>- Nedostatak DC rastavljača zahtijevalo je izvlačenje 56 osigurača |
| Delanco, NJ,<br>United States<br>Rujan 2013.       | Skladište, 1.6MW na krovu                     | 30,000m <sup>2</sup> uništeno u požaru                | - Vatrogasci odlučili kako neće raditi na krovu zbog opasnosti od strujnog udara   |
| La Farge, WI,<br>United States<br>Svibanj 2013.    | Uredski prostor, 70kW na krovu                | Krilo zgrade od 4,000m <sup>2</sup> uništeno u požaru | - Pokrivenost krova fotonaponskim modulima onemogućila je ventilaciju, te ubrzala djelomično urušavanje krovne konstrukcije    |
| Waldorf,<br>Germany                                | Skladište                                     | Nastala šteta u iznosu od                             | - Za montažu sustava korištene su ploče od sintetičke smole  |

|                                     |          |   |  |
|-------------------------------------|----------|---|--|
| Lipanj 2014.                        |          | nekoliko tisuća eura                            |  |
| Norderney, Germany<br>Kolovoz 2013. | Tvornica | Nastala šteta u iznosu od nekoliko miliona eura | - Krovna konstrukcija se urušila zajedno sa fotonaponskim modulima na njoj |

Analizom vatrogasnih događaja iz 2013. godine koji uključuju fotonaponske sustave u Njemačkoj u periodu od 1995. godine do 2012. godine zaključuje se kako se u zadanom periodu ukupna snaga fotonaponskih sustava povećala na više od 30 GW. Analizom je obuhvaćeno 400 slučajeva požara sa uključenim fotonaponskim sustavima, u 180 slučajeva fotonaponski sustav bio je uzročnik požara [12].



Slika 9. Komponente koje su uzročnik požara u Njemačkoj u razdoblju od 1995. godine do 2012. godine [12]

## **4. OPASNOSTI OD FOTONAPONSKIH SUSTAVA ZA VATROGASCE**

Prisutnost fotonaponskog sustava u blizini požara može stvoriti dodatne opasnosti kao što su padovi, strujni udar, te urušavanje dijelova krovne konstrukcije. U slučajevima kada je uzročnik požara fotonaponski sustav, njegovo prisustvo na objektu može stvoriti dodatne probleme. Dodatna težina solarnih modula na krovnoj konstrukciji može dovesti do ubrzanog urušavanja dijelova krovne konstrukcije uslijed požara. Na kosim krovovima, staklena površina fotonaponskih panela predstavlja povećani rizik od poskliznuća što može dovesti do pada s visine. Površina krova prekrivena fotonaponskim panelima dovodi do ograničenog mjesta kretanja kao i smanjenja mogućih mjesta za izradu ventilacijskih otvora.

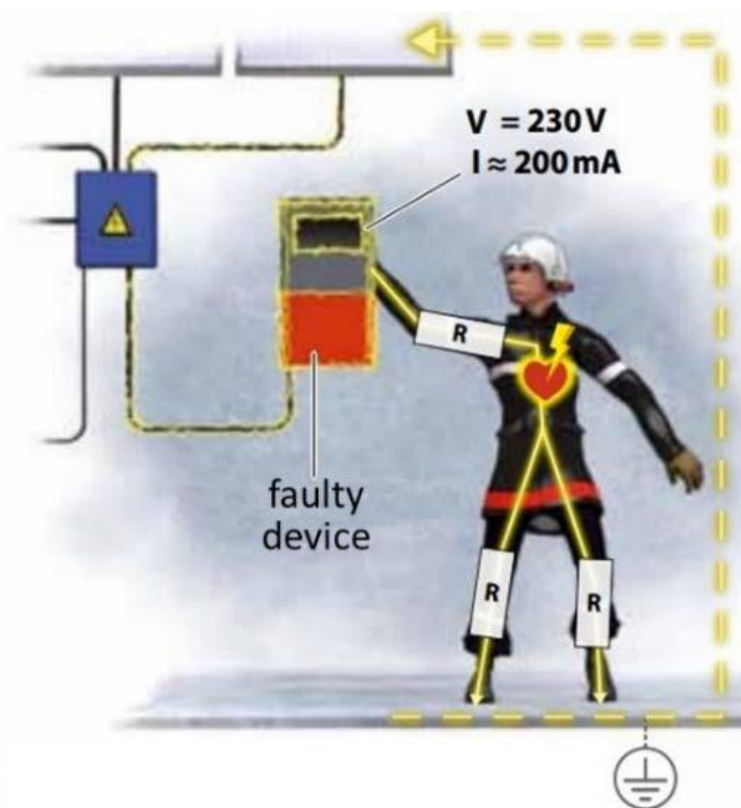
Kao glavnu opasnost povezanu s fotonaponskim sustavima predstavlja električna struja. Činjenica je da fotonaponski sustav može na prosječnom krovu generirati istosmjerni napon do 1000V, koji je pri danjem svjetlu prisutan u instalacijama bez obzira na rastavljače ili osigurače [9].

Zakonski je propisana visina dopuštenog napona dodira na vrijednost od 50V za izmjeničnu, odnosno 120V za istosmjernu struju koja je dozvoljena da se održava neograničeno vrijeme pri utvrđenim uvjetima vanjskih utjecaja.

| Dozvoljeno trajanje dodira (s) | Napon dodira AC (V) | Napon dodira DC (V) |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| ∞                              | ≤ 50 V              | ≤ 120 V             |
| 5 s                            | 50 V                | 120 V               |
| 1 s                            | 75 V                | 140 V               |
| 0,5 s                          | 90 V                | 160 V               |
| 0,2 s                          | 110 V               | 175 V               |
| 0,1 s                          | 150 V               | 200 V               |
| 0,05 s                         | 220 V               | 250 V               |
| 0,03 s                         | 280 V               | 310 V               |

Slika 10. Dopušteni napon dodira za istosmjernu i izmjeničnu struju [9]

Ukoliko se tijelo čovjeka uključi u strujni krug u kojemu postoji napon, kroz njegovo tijelo protjecati će struja odgovarajuće jakosti određena otporom tijela i prolaznim otporom između čovjeka i zemlje.



Slika 11. Dodir uređaja pod naponom i čovjeka [11]



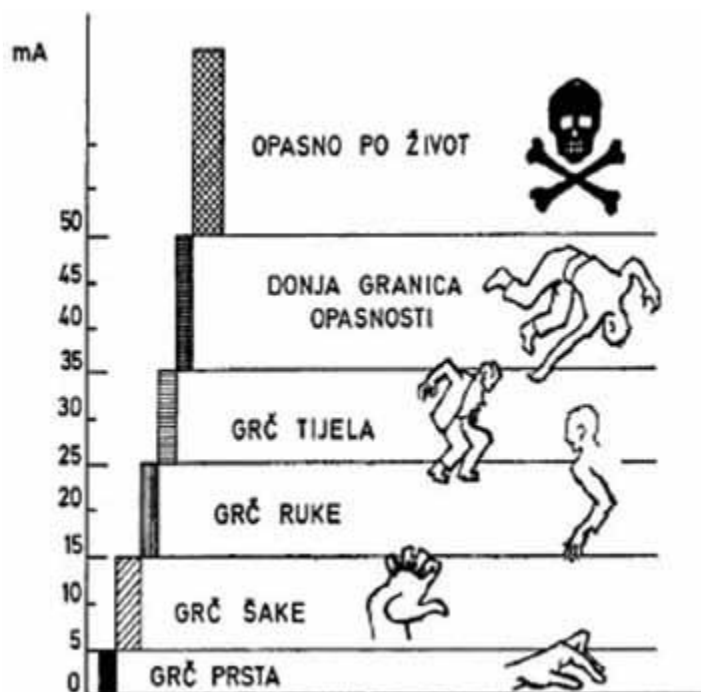
Jakost struje možemo izračunati prema formuli:

$$I = \frac{U}{R} \left[ \frac{V}{\Omega} = A \right] \quad (1)$$

$I$  – jakost struje koja protječe kroz čovjekovo tijelo [A]

$U$  – razlika potencija, napon [V]

$R$  – otpor čovjekovog tijela [ $\Omega$ ]

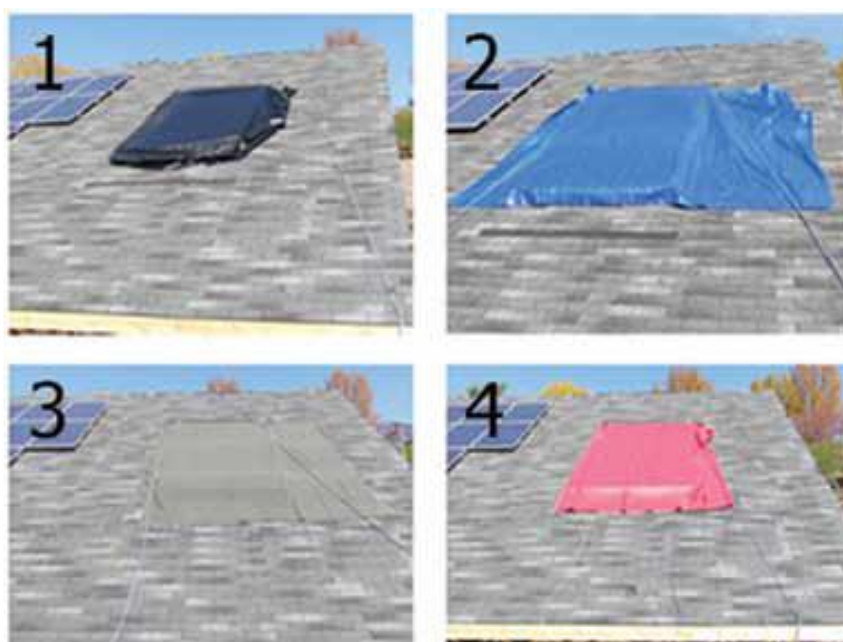


Slika 12. Posljedice za čovjeka u odnosu na jakost struje [9]

Ukoliko je visina napona  $U = 500 \text{ V}$ , a otpor tijela  $R=750 \text{ }\Omega$ , jakost struje  $I$  koja će protjeći kroz tijelo iznositi će:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{500 \text{ [V]}}{750 \text{ [\Omega]}} = 0,67 \text{ A} = 670 \text{ mA}$$

Kako električna struja predstavlja najveću opasnost prilikom intervencija koje uključuju fotonaponske sustave tako i doba dana ima svoj faktor iz razloga što fotonaponski paneli prilikom izlaganja sunčevoj svjetlosti ne mogu biti isključeni. Pjena ili prekrivači mogu se koristiti za blokiranje svjetla koje dolazi na fotonaponski panel. Prekrivači, ovisno o svom sastavu, nude različite stupnjeve učinkovitosti u pogledu blokiranja prodiranja svjetlosti. Fotonaponski panel koji nije prekriven ne može biti isključen. Istraživanjima se došlo do spoznaje da gusto tkane tkanine i tamne plastične folije smanjuju proizvedenu struju iz fotonaponskog panela na vrijednost blizu nule.



Slika 13. Prekrivanje fotonaponskih panela sa različitim vrstama prekrivača [9]



Slika 14. Prekrivanje fotonaponskih panela pjenom [9]

Rezultati prekrivanja fotonaponskih panela pjenom nisu se pokazali kao najbolje rješenje iz razloga što se u početku nanosa napon smanjio na 50% početne vrijednosti dok se nakon samo 5 minuta vrijednost napona vraća na 80% početne vrijednosti napona [9].

Tablica 2. Rezultati ispitivanja prekrivanja fotonaponskih panela različitim vrstama prekrivača [9]

| Prekrivač broj | Prekrivač                      | Boja   | Napon [V] | Jakost struje [A] | Opasnost |
|----------------|--------------------------------|--------|-----------|-------------------|----------|
| 1              | Plastična folija               | Crna   | 33        | 0                 | Sigurno  |
| 2              | Višenamjenska plastična cerada | Plava  | 126       | 2,1               | Opasno   |
| 3              | Protupožarni prekrivač         | Zelena | 3,2       | 0                 | Sigurno  |
| 4              | PVC prekrivač                  | Crvena | 124       | 1,8               | Opasno   |
| Bez            | Bez prekrivača                 |        | 148       | 8,1               | Opasno   |

U slučajevima oštećivanja fotonaponskih panela u požaru ispitivanjima je utvrđena prisutnost električne struje. S obzirom da je na većini vodiča došlo do sagaranja izolacije posebnu pozornost potrebno je obratiti na opasnost od indirektnog i direktnog dodira. Također je potrebno posvetiti dodatnu pažnju u ovakvim slučajevima jer nisu samo opasni prilikom gašenja požara već su i nakon gašenja moguća ponovna zapaljenja ili opasnosti za osobe koje se mogu naći nakon požara u takvom prostoru.



Slika 15. Napon fotonaponskog panela nakon oštećenja [9]

U slučajevima gašenja požara fotonaponskog panela ili u njegovoj blizini, gašenje se vrši upotrebom aparata za početno gašenje požara prahom i ugljičnim dioksidom. Kod gašenja većih požara gašenje se vrši upotrebom vode kao sredstva za gašenje poštivanjem sigurnosnih udaljenosti za gašenje električnih instalacija pod naponom.

Tablica 3. Sigurnosne udaljenosti za gašenje uređaja i instalacija pod naponom prema normi CM-DIN 14365

|                | Niski napon (<1000V) | Visoki napon (>1000V) |
|----------------|----------------------|-----------------------|
| Raspršeni mlaz | 1,0m                 | 5,0m                  |
| Puni mlaz      | 5,0m                 | 10,0m                 |
| Oznaka         | N-1-5                | H-5-10                |

Intervencije koje se dogode u noći, a uključuju fotonaponske sustave također su dodatno opasne iz razloga što treba obratiti pozornost na osvjetljavanje mjesta intervencije kao i fotonaponskih panela. Autori u stručnim literaturama navode kako i prilikom umjetnog osvjetljenja reflektorima te svjetlosti od vatre može doći do stvaranja napona.



Slika 16. Osvjetljenje fotonaponskog panela reflektorima i plamenom [9]

Potrebno je obratiti pozornost i na zabranjeno hodanje, oštećivanje panela iz potrebe pravljenja ventilacijskog otvora na bilo koji način jer na taj način možemo izazvati strujni udar, iskrenje, oštećivanje izolacije vodiča što dovodi do povećane opasnosti od direktnog i indirektnog dodira s opasnim naponom te uzrokovati zapaljenje fotonaponskog panela, a samim time i krovne konstrukcije.



Slika 17. Inducirani opasni napon nakon oštećivanja solarnog modula [9]

Kod intervencija na objektima koji uključuju fotonaponske sustave, objektu je potrebno prilaziti sa one strane s koje ne prijete pad fotonaponskih panela. Pad modula na interventno osoblje može biti opasno po život.

Ukoliko su prisutne baterije za akumulaciju električne energije u požaru, gašenje požara vrši se upotrebom praha, ugljičnog dioksida i pjene kao sredstva za gašenje, dok voda zbog svojih fizikalnih osobina ne bi trebala biti prvi izbor. Kod gašenja takvih vrsta požara zaštita organa za disanje je obavezna jer baterije u požaru stvaraju izuzetno korozivne plinove i pare, te može doći do propuštanja elektrolita iz baterije koji može reagirati s drugim metalima i proizvoditi otrovne, zapaljive i eksplozivne plinove.

## 5. MJERE ZAŠTITE OD POŽARA ZA FOTONAPONSKE SUSTAVE

Implementacija tehnologije, kako uređaja tako i programa, mogu vatrogascima pružiti bolji uvid i kontrolu nad opasnostima povezanima sa fotonaponskim sustavima. Sigurnosne sklopke i prekidači mogu smanjiti rizik nastanka požara iz vodiča pod naponom. Isključeni prekidači mogu smanjiti broj vodiča pod naponom dok je fotonaponski panel osvjetljen i proizvodi električnu energiju.

Električna oprema kao što su izmjenjivači, regulatori punjenja, itd. postavljaju se u zatvorene prostorije koje bi trebale biti štice sustavom za automatsku dojavu požara, posebno kod postrojenja gdje nema posade. Alarmni signal prosljeđuje se na stalno zaposjednuto mjesto, a ako se ne očekuje brza provjera alarma, izvršni sustavi nakon aktivacije dva javljača trebaju isključiti električnu energiju [15].

### 5.1. Mjere zaštite od požara prilikom projektiranja

Kako investitori najčešće imaju u cilju proizvesti što je moguće više električne energije, projektanti obično postavljaju fotonaponske panele pregusto po krovu, što rezultira povećanim rizikom od nastanka požara, onemogućuje efikasno gašenje požara, te otežava održavanje postavljene opreme. Grupiranje fotonaponskih panela na površinama većim od 40m x 40m se ne preporučuje, a između takvih odjeljaka potrebno je ostaviti slobodne koridore širine 5m. Cilj je ne premašiti 1600 m<sup>2</sup> u požarnom odjelu. Fotonaponske panele potrebno je udaljiti od dimovodnih i ventilacijskih otvora minimalno 2,5 m kako se požar ne bi proširio van požarnog odjela gdje je nastao [15].

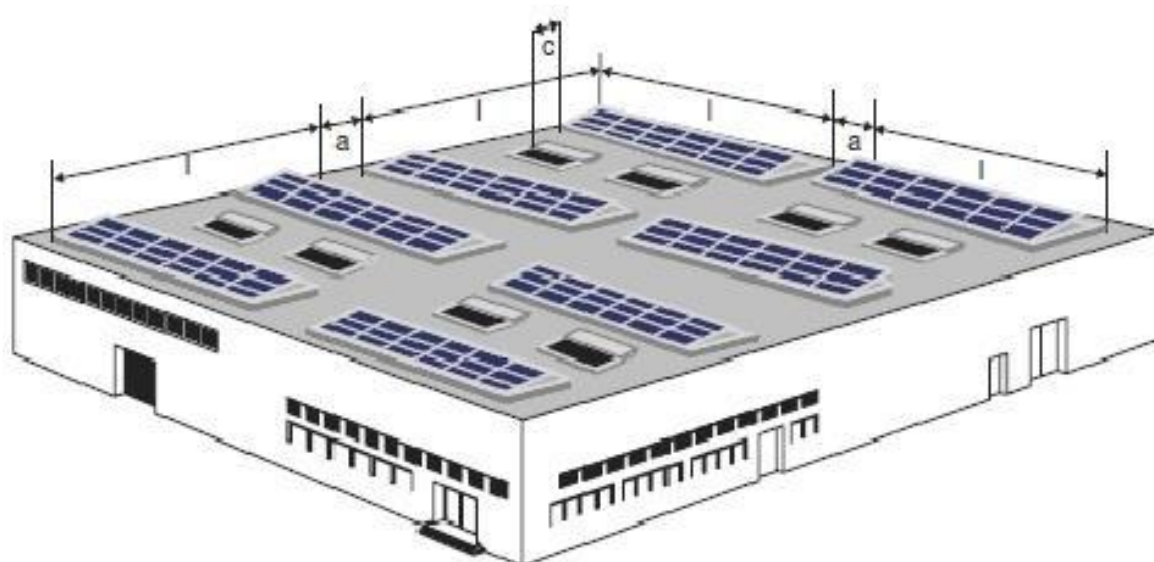
Slika 18. prikazuje grupiranje fotonaponskih panela po dužini i širini za  $l \leq 40m$  gdje je koridor između grupa fotonaponskih panela  $a \geq 5m$ .





Slika 18. Prikaz načina grupiranja fotonaponskih panela [16]

Slika 19. prikazuje udaljenosti između fotonaponskih panela i dimovodnih, odnosno ventilacijskih otvora. Gdje je  $c=2,5$  m ako su fotonaponski panela i otvori na istoj visini. Odnosno  $c=5$  m ako je razlika visina između fotonaponskih panela i otvora  $\leq 2,5$  m, a ako je razlika visina  $>2,5$  m tada je potrebno posebno razmotriti svaki slučaj za sebe.



Slika 19. Prikaz udaljenosti između fotonaponskih panela i otvora [16]

Navedene udaljenosti prikazane su na ravnom krovu, a iste vrijede i za postavljanje fotonaponskih panela na kosim krovovima.



## 5.2. Prekidač greške na uzemljenju

Greške na uzemljenju kroz koje protječe struja u uzemljenim vodičima stvaraju opasnost od nastanka požara i opasnost od strujnog udara. Neprekidni protok električne energije uzrokuje zagrijavanje vodiča i moguće stvaranje električnog luka što dovodi do uzroka nastanka požara. Budući da uzemljene komponente mogu biti neizolirane (kao što su metalni okvir modula) kontakt s tim komponentama u stanju zemljospoja može izazvati strujni udar. Kao rezultat toga, zaštite od zemljospoja za fotonaponske sustave su u širokoj upotrebi još od 1990-ih. Na primjer, u Sjedinjenim Američkim Državama još 1993. godine kroz NEC (*National Electrical Code*), članak 690.5, propisano je kako uzemljeni fotonaponski paneli postavljeni na krovu moraju imati zaštitu od zemljospoja koji je u stanju prepoznati kvar, prekinuti strujni krug i izbaciti iz funkcije fotonaponski panel u kvaru. Nedavno je dodana stavka u kojoj na instalaciji mora postojati indikator zemljospoja u obliku crvene tinjalice koja će tinjati u slučaju kvara. Kada se otkrije prekomjerna jakost struje prema zemlji, prekidač greške na uzemljenju prekida strujni krug i sprječava nastavak zemljospoja.

Kao i kod svake tehnologije, dodavanje prekidača greške na uzemljenju može imati neželjene posljedice. Smatra se kako je požar u Bakersfield-u (opisan u Tablici 1.) nastao kada je fotonaponski sustav imao dvije greške na uzemljenju. Prvi zemljospoj ostao je neotkriven, a kada je došlo do drugog zemljospoja pokrenuo se GFCI (prekidač uzemljenja) koji je spletom okolnosti povećao struju koja teče kroz prvi zemljospoj i time izazvao požar [11].

## 5.3. Prekidač električnog luka

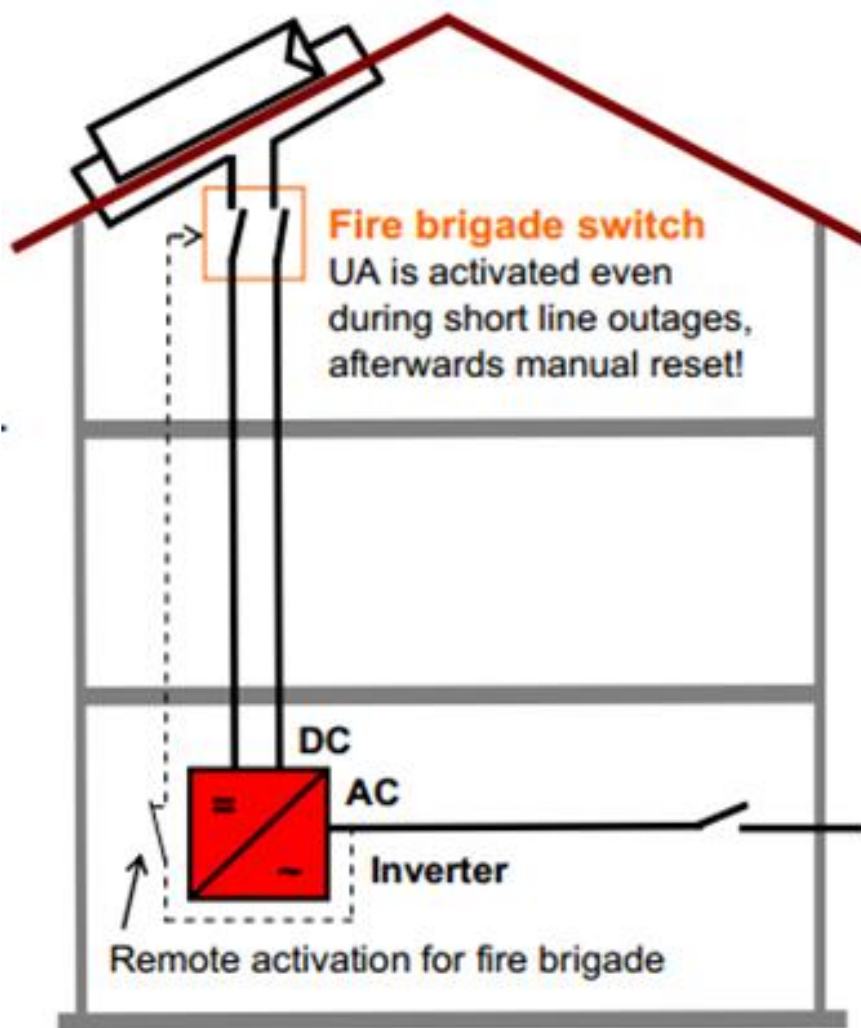
Električni luk pojavljuje se kada električna energija teče kroz medije velikog otpora kao što je zrak. Veliki otpor zraka dovodi do velike temperature električnog luka što u konačnici može izazvati požar. Oscilirajuća priroda izmjenične struje čini električne lukove samogasivima dok kod istosmjerne struje to nije slučaj već se mogu razviti takvi električni lukovi koji mogu izazvati požar na okolnim gorivim tvarima. Uređaj za rješavanje ovoga problema uključuje detektor električnog luka i uređaj za prekidanje. U usporedbi s otkrivanjem zemljospoja, otkrivanje

električnog luka je mnogo teže. Korištenjem uzemljenja još je teže otkriti nastanak električnog luka, neuzemljeni fotonaponski sustavi koji se češće koriste u Europi mnogo su robusniji i postoji manja šansa od nastanka električnog luka.

Budući da su uzemljeni fotonaponski sustavi i dalje uobičajeni u Sjedinjenim Američkim Državama, otkrivanje električnog luka i prekid istoga postao je sve važniji. Prisutnost električnog luka u uzemljenim sustavima može biti isprekidan i posebno ga je teško razlikovati od normalnog rada sustava. Različiti uređaji za otkrivanje kvara nadziru napon, struju i emitirano zračenje. Detektor električnog luka mora biti osjetljiv na male razlike u stanju strujnog kruga. Od 2011. godine prekidač električnog luka koji otkriva i prekida električne lukove mora biti obavezan u fotonaponskim sustavima u Sjedinjenim Američkim Državama [11].

#### **5.4. Sklopka za brzo isključivanje (vatrogasni prekidač)**

U nekoliko zemalja, uključujući Australiju, Njemačku i Sjedinjene Američke Države, porast broja fotonaponskih sustava koje postaju pod naponom uslijed utjecaja sunčeve svjetlosti, doveo je do potrebe za „vatrogasnim prekidačem“ koji može smanjiti opasnost od strujnog udara.



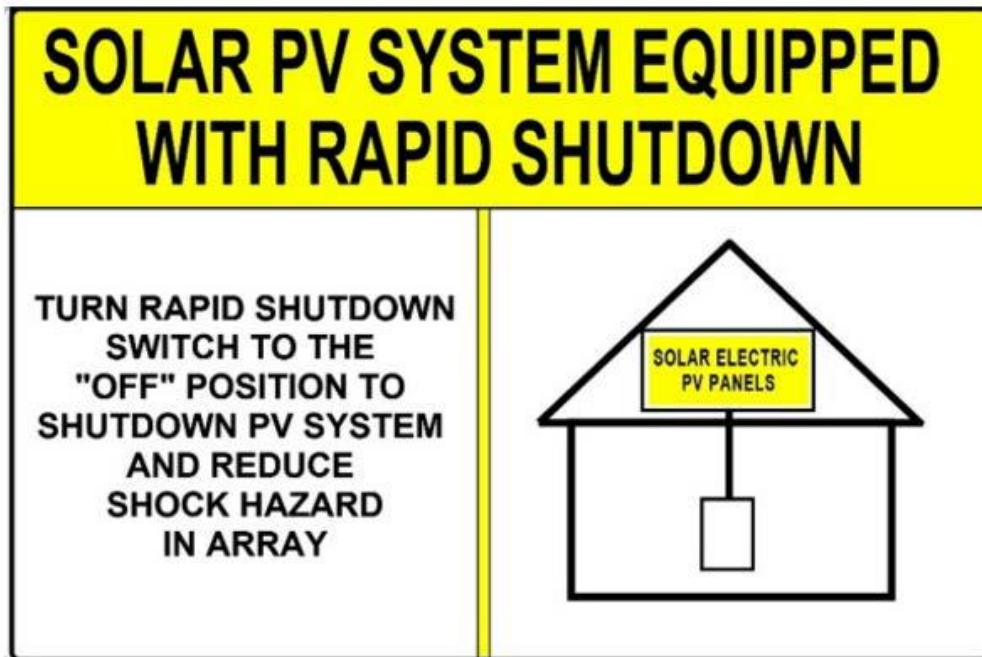
Slika 20. Vatrogasni prekidač [11]

U Sjedinjenim Američkim Državama to je poprimilo oblik opreme za brzo gašenje. Sposobnost izvođenja brzog isključivanja postala je neophodna kako bi se fotonaponski sustavi uskladili s NEC, NFPA 70, članak 690.12 normom [13]. Prekidač za brzo isključivanje omogućuje daljinsko iskapčanje istosmjerne strane strujnog kruga za upotrebu u hitnim slučajevima i održavanja.

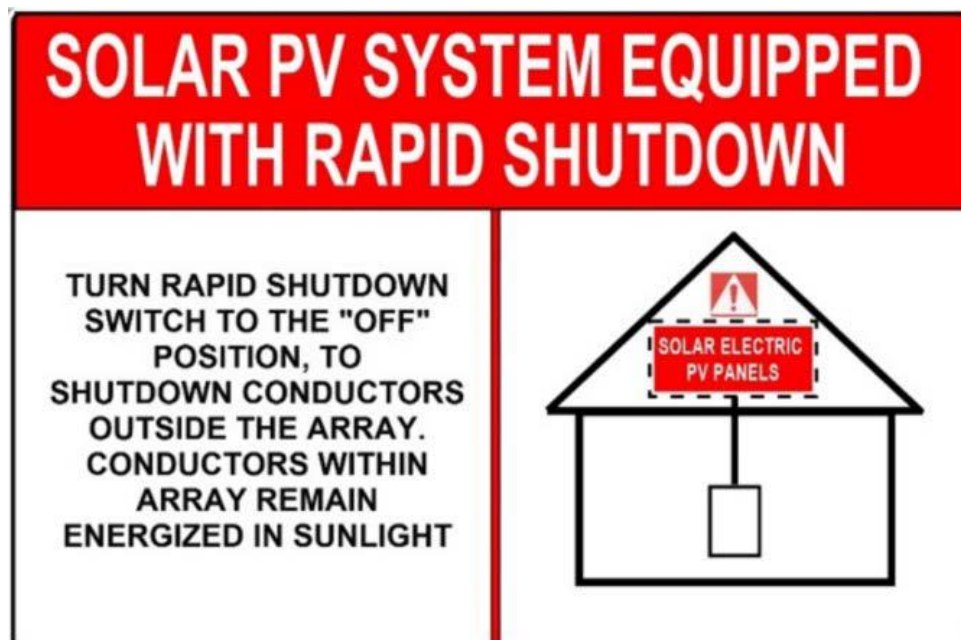
Sukladno NEC, NFPA 70, članku 690.12 iz 2014.godine navodi se kako vodiči pod naponom izvan okvira fotonaponskih panela moraju unutar 10 sekundi od pokretanja vatrogasnog prekidača biti ispod 30 V nazivnog napona.

2017. godine dodaje se odredba vezana za vodiče koji ostaju pod naponom, a nalaze se unutar okvira fotonaponskog panela. Uvodi se ograničenje od 80 V maksimalnog napona za brzo isključivanje vodiča pod naponom unutar fotonaponskog panela. Granica od 80 V nije usklađena s obzirom na postojeće granice maksimalnih napona vezanih za pristup opremi i uređajima pod naponom. Budući da konvencionalni fotonaponski sustavi induciraju napon veći od 40 V u uvjetima otvorenog kruga, novo ograničenje od 80 V zahtijeva dodatnu opremu za svaki pojedinačni panel. Za fotonaponske panele koji se sastoje od dva ili više reda modula to za posljedicu može imati zamjenu ili provjeru uređaja za brzo isključivanje. Zahtjev za isključivanje na razini modula koji proizlazi iz ograničenja napona od 80 V pokazao se spornim [14]. Kao odgovor na problematiku usklađenosti postoji rješenje korištenja fotonaponskih panela bez vodljivih dijelova.

Zabrinutost u vezi korištenja oznake brzog isključivanja i za vodiče bez napona izvan granica fotonaponskih panela i za vodiče pod naponom unutar granica fotonaponskih panela je kako izbjeći davanje lažnog osjećaja sigurnosti interventnom osoblju. Na primjer, oznaka prikazana na Slici 21. ne bi se trebala tumačiti tako da sugerira da je električna energija isključena unutar granica fotonaponskog panela jer će panel obasjan sunčevom svjetlosti i njegovi vodiči ostati i dalje pod naponom nakon isključivanja. Dok oznaka prikazana na Slici 22. vjerodostojnije govori o tome koji dijelovi fotonaponskog sustava ostaju pod naponom nakon isključivanja sklopke za brzo isključivanje.



Slika 21. Predložen način označavanja fotonaponskih sustava s ugrađenom sklopkom za brzo isključivanje gdje je moguće krivo tumačenje oznake [11]



Slika 22. Predložen način označavanja fotonaponskih sustava s ugrađenom sklopkom za brzo isključivanje s jasno definiranim naponskim stanjima [11]

## 6. ZAKLJUČAK

Budući kako je industrija fotonaponskih sustava posljednjih godina doživjela snažan rast, tako je stvorila i određene probleme kako zakonodavne naravi tako i pri vatrogasnim intervencijama s uključenim fotonaponskim sustavima. Najveći problem predstavljaju dodatne opasnosti, poduzimanje dodatnih mjera zaštite te nedostatak edukacija i usavršavanja pri takvim tipovima vatrogasnih intervencija.

Važno je također poznavati vrste i osnovna načela fotonaponskih sustava kako bi taktički pristup pri intervenciji s uključenim fotonaponskim sustavima mogli prilagoditi ovisno o zatečenoj situaciji. Vatrogasci bi trebali biti upoznati sa uređajima i opremom, svim opasnostima i dodatnim mjerama zaštite pri takvom tipu intervencije, što će u konačnici utjecati na sami ishod intervencije.

Educiranjem, analizom i proučavanjem kako strane literature tako i stvarnih intervencija moguće je dodatne opasnosti kod intervencija s uključenim fotonaponskim sustavima svesti na minimalnu razinu, spasiti imovinu kao i ljudske živote.

## 7. LITERATURA

- [1] International energy agency – Photovoltaic power systems program, <https://iea-pvps.org/> , 24.04.2022.
- [2] <https://www.mrsolar.com/photovoltaic-effect/> , 24.04.2022.
- [3] <http://www.skender.hr/solarna/fotonaponski.html> , 24.04.2022.
- [4] P. Kulušić, J. Vuletin, I. Zulim: Sunčane ćelije, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [5] <https://www.automatika.rs/baza-znanja/green-engineering/fotonaponska-celija-princip-rada-karakteristike-i-efikasnost.html> , 26.04.2022.
- [6] Đurađ Mudrinić: Zaštita fotonaponskih elektrana, Osijek 2016.
- [7] <http://www.solarniprojekti.hr/fotonaponski-sustavi.html> , 26.04.2022.
- [8] Lj. Majdandžić: Solarni sustavi, Graphis d.o.o., Zagreb, 2010.
- [9] Vatrogastvo i upravljanje požarima, br.2/2015., vol. V – M. Šipuš: Gašenje požara na objektima s ugrađenim fotonaponskim sustavom
- [10] Lj. Majdandžić: Fotonaponski sustavi, priručnik, Zagreb, 2010.
- [11] International Energy agency: Photovoltaic and Firefighters' Operations: Best practice in Selected Country, Report IEA-PVPS T12-09:2017
- [12] Laukamp et al., 2013 EU PVSEC:PV fire hazard – analysis and assessment of fire incidents, 2013.
- [13] NFPA,NFPA 70:National Electrical Code, 2017.
- [14] SMA America, Evaluating the Case for Module-Level Shutdown An Increase in Safety or the Creation of Perceived Danger
- [15] Z. Primorac: Mjere zaštite od požara prema novim normama za elektroenergetska postrojenja visokog napona, seminar Zagreb 12.05.2016.
- [16] CFPAE Guideline: Photovoltaic systems – Recommendations on loss prevention

## 8. PRILOZI

### 8.1. Popis slika

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 1.  | Osnovna građa fotonaponske ćelije [3].....  | 3  |
| Slika 2.  | Fotonaponska ćelija [5] .....   | 4  |
| Slika 3.  | <i>Fotonaponski sustav</i> [6].....   | 5  |
| Slika 4.  | Elementi fotonaponskog sustava [6] .....  | 6  |
| Slika 5.  | Izmjenjivač DC/AC s automatskim uključenjem/isključenjem [7] .....  | 7  |
| Slika 6.  | Samostalni fotonaponski sustav [9].....   | 8  |
| Slika 7.  | Hibridni fotonaponski sustav sa strujnim generatorom [10].....  | 9  |
| Slika 8.  | Mrežni fotonaponski sustavi [9].....  | 10 |
| Slika 9.  | Komponente koje su uzročnik požara u Njemačkoj u razdoblju od 1995. godine do 2012. godine [12] .....   | 12 |
| Slika 10. | Dopušteni napon dodira za istosmjernu i izmjeničnu struju [9] .....   | 14 |
| Slika 11. | Dodir uređaja pod naponom i čovjeka [11] .....  | 14 |
| Slika 12. | Posljedice za čovjeka u odnosu na jakost struje [9].....  | 15 |
| Slika 13. | Prekrivanje fotonaponskih panela sa različitim vrstama prekrivača [9]<br>16   |    |
| Slika 14. | Prekrivanje fotonaponskih panela pjenom [9] .....   | 16 |
| Slika 15. | Napon fotonaponskog panela nakon oštećenja [9] .....  | 18 |
| Slika 16. | Osvjetljenje fotonaponskog panela reflektorima i plamenom [9]...  | 19 |
| Slika 17. | Inducirani opasni napon nakon oštećivanja solarnog modula [9]..   | 19 |
| Slika 18. | Prikaz načina grupiranja fotonaponskih panela [16] .....  | 22 |
| Slika 19. | Prikaz udaljenosti između fotonaponskih panela i otvora [16] .....  | 22 |
| Slika 20. | Vatrogasni prekidač [11] .....  | 25 |
| Slika 21. | Predložen način označavanja fotonaponskih sustava s ugrađenom sklopkom za brzo isključivanje gdje je moguće krivo tumačenje oznake [11].....  | 27 |
| Slika 22. | Predložen način označavanja fotonaponskih sustava s ugrađenom sklopkom za brzo isključivanje s jasno definiranim naponskim stanjima [11]..... | 27 |



## 8.2. Popis tablica

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tablica 1. | Primjeri požara na objektima koji uključuju fotonaponske sustave [11] .....                        | 11 |
| Tablica 2. | Rezultati ispitivanja prekrivanja fotonaponskih panela različitim vrstama prekrivača [9] .....     | 17 |
| Tablica 3. | Sigurnosne udaljenosti za gašenje uređaja i instalacija pod naponom prema normi CM-DIN 14365 ..... | 18 |