

Proračun solarnih termalnih paraboličnih žljebastih kolektora

Horvatinec, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:149:205314>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-20**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Vedran Horvatinec

Proračun solarnih termalnih paraboličnih žljebastih kolektora

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: Prof. dr. sc. Zvonimir Glasnović

Članovi ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Glasnović

Prof. dr. sc. Ante Jukić

Prof. dr. sc. Juraj Šipušić

Zagreb, veljača 2020.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Zvonimiru Glasnoviću, na stručnom vodstvu, pomoći pri izradi rada, te savjetima koji će mi biti vrlo korisni kroz život. Želio bih se također zahvaliti na uloženom trudu, savjetima i strpljenju pri izradi diplomskog rada. Također, imali smo nekoliko vrlo zanimljivih diskusija koje smatram korisnim za moj budući razvoj. Najljepše hvala na znanju i načinu razmišljanja koji ste prenijeli na mene.

Hvala mojim kolegama sa studija koji su bili tu uz mene za vrijeme studiranja. Posebno bih se zahvalio na razumijevanju, podršci i suradnji te se nadam da ćemo i nakon studija nastaviti uspješno surađivati.

Posebno bih se zahvalio mojim roditeljima i sestri koji su mi omogućili da se visoko obrazujem te što su bili tu kraj mene kad je zatrebalo te me u svemu podupirali.

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
1.1. Solarno zračenje.....	1
1.2. Povijest paraboličnih žljebastih kolektora.....	3
2. OPĆI DIO	6
2.1. Učešće paraboličnih žljebastih kolektora u koncentratorskim termalnim sustavima	6
2.2. Izvedeni sustavi s paraboličnih žljebastim kolektorima	7
2.3. Geometrija paraboličnog kolektora.....	13
2.4. Omjer koncentracije	17
2.5. Konstrukcijski materijali paraboličnog zrcala	18
2.6. Nosiva konstrukcija.....	21
2.7. Praćenje Sunca	22
2.8. Apsorpcijska cijev	23
3. PRORAČUN PARABOLIČNIH ŽLJEBASTIH KOLEKTORA.....	26
3.1. Proračun efikasnosti	26
3.2. Optički gubitci	29
3.3. Toplinski gubitci	34
3.4. Proračun proizvedene energije.....	40
4. REZULTATI.....	44
5. RASPRAVA I ZAKLJUČCI	54
POPIS SIMBOLA:	57
LITERATURA.....	61
ŽIVOTOPIS	64

SAŽETAK

Radom je prikazan proračun termalnih paraboličnih žljebastih kolektora, čije učešće u koncentratorskim sustavima danas zauzima oko 90%. Razlog njihove, tako velike primjene je najniža cijena u odnosu na druge termalne koncentratorske sustave. Uz to, ta vrsta kolektora postiže relativno visoku efikasnost pretvorbe iz solarne u toplinsku energiju (60-80%, a što ovisi o omjeru koncentracije, odnosno postignutoj temperaturi), dok učinkovitost pretvorbe u električnu energiju kod solarnih termalnih elektrana iznosi oko 14-16%. Problem paraboličnih žljebastih kolektora je da oni koriste samo direktnu komponentu solarnog zračenja i to samo kad ono prelazi intenzitet od 300 W/m^2 (što odgovara dnevnim vrijednostima energije solarnog zračenja iznad 2 kWh/m^2), dok im je najveći nedostatak da oni moraju pratiti Sunce. Proračuni polaze od termičkih gubitaka reflektora i apsorpcijske cijevi. Prikupljena solarna energija predstavlja umnožak faktora djelotvornosti za odvođenje topline, zatim dugoročnog prosjeka optičke djelotvornosti kolektora, dugoročnog prosjeka faktora iskorištenja Sunčeve energije prema *Hottel-Whillierovom* konceptu i prosječne dnevne vrijednosti prikupljene solarne energije. Pri tome se energija koja je prikupljena kolektorom računa kao razlika energije hemisfernog i difuznog zračenja, dok je veličina dugoročnog prosjeka faktora iskorištenja Sunčeve energije nelinearna funkcija indeksa vedrine i kritičnog omjera energija. U svrhu proračuna proizvedene toplinske energije paraboličnih žljebastih kolektora u realnim uvjetima, odabrana je lokacija Otoka Visa na kojoj godišnje vrijednosti solarnog zračenja iznose 1545 kWh/m^2 . Proračunima su dobivene jedinične vrijednosti proizvedene toplinske energije od 459.57 kWh/m^2 , a koja bi, uz učinkovitost pretvorbe iz toplinske u električnu energiju od 35%, mogla proizvesti 160.85 kWh/m^2 električne energije. Problem primjene termalnih paraboličnih žljebastih kolektora se ogleda u tome da u tri mjeseca (studenom, prosincu i siječnju) oni praktički ne mogu proizvoditi energiju pa bi se elektrana s tom vrstom kolektora u konkretnom slučaju morala spojiti na električnu mrežu. Međutim, ukoliko bi se solarna termalna elektrana s paraboličnim žljebastim kolektorima integrirala s reverzibilnom hidroelektranom, takav integrirani izvor energije bi mogao kontinuirano napajati sva naselja Otoka Visa tijekom cijele godine.

Ključne riječi: obnovljivi izvori energije, solarna energija, solarna termalna elektrana, parabolični žljebasti kolektor, proračuni

ABSTRACT

The calculation of the parabolic trough collectors, which make 90% in current solar concentrators system is presented in this Master's thesis. The reason of their wide application is the lowest price comparing to the other thermal concentration systems. In addition, this type of collector achieves relatively high conversion efficiency from solar into thermal energy (60-80%, what depends on concentration ratio and achieved temperature), whereas efficiency of conversion from solar to electrical energy in solar thermal power plants is approximately 14-16%. The problem of parabolic trough collectors is that only direct component of solar radiation can be used and it is only when solar radiation exceeds 300 W/m^2 intensity (corresponding to daily solar radiation above 2 kWh/m^2), whereas their biggest disadvantage is that they need track the sun. Calculations start from thermal losses of reflector and absorption tube. Collected solar energy is calculated from the product of heat removal factor, then long-term optical collector efficiency average, long-term average utilization factor of solar energy based on *Hottel-Whillier* concept and average daily value of the collected solar energy. Thereby collected energy is calculated as the energy difference of hemispheric and diffuse radiation, while long-term optical collector efficiency average of solar energy is based on unlinear function of clearness index and critical energy ratio. For the purpose of calculation of produced parabolic trough collectors thermal energy in real conditions, the location of the Island of Vis was selected, with annual solar radiation values of 1545 kWh/m^2 . By calculations, produced thermal energy unit values of 459.57 kWh/m^2 are obtained, and it could produce 160.85 kWh/m^2 of electrical energy, by means of 35% thermal to electric energy conversion efficiency. Thermal parabolic trough collectors problem comes from that, for the winter months time (November, December and January), they are not able to produce energy so power plant with that kind of collectors should be connected to electrical network. However, if solar thermal plant with parabolic trough collectors is integrated with pump storage hydroelectric, such integrated energy source could continuously supply all settlements on the Island of Vis, throughout the whole year.

Keywords: *renewable energy sources, solar energy, solar thermal power plant, parabolic trough collector, calculations*

1. UVOD

1.1. Solarno zračenje

Sve veće korištenje fosilnih goriva i posljedično globalno zagrijavanje, uvjetuje čovječanstvu prijelaz na obnovljive izvore energije (OIE). Prelazak na obnovljive izvore energije nužan je u cilju održivog razvoja i smanjivanja emisija stakleničkih plinova koji pridonose globalnom zagrijavanju. Emisije stakleničkih plinova povezuju se s izgaranjem fosilnih goriva, najčešće ugljikova dioksida CO₂ i dušikovih spojeva. Republika Hrvatska se, kao članica Europske unije, obvezala na prihvaćanje europskog klimatsko-energetskog paketa koji podrazumijeva i *Direktivu 2009/28/EZ* Europskog parlamenta i Vijeća iz 2009. godine o poticanju uporabe energije iz obnovljivih izvora energije. Prihvaćanjem direktive, Republika Hrvatska je preuzela obvezu povećanja uporabe energije iz obnovljivih izvora, pri čemu bi u 2020. godini udio energije iz obnovljivih izvora u bruto neposrednoj potrošnji trebao iznositi najmanje 20%, promatrano na razini Europske unije [1]. Najznačajniji obnovljiv izvor energije predstavlja solarna energija, s obzirom da je Sunčevo zračenje neiscrpan izvor energije. U Dalmaciji i otocima (Vis) direktno Sunčevo zračenje je relativno veliko pa je očito da postoji potencijal za njegovo korištenje.

Sunčevo zračenje sastoji se od tri komponente: direktne, difuzne i albedo komponente (zračenje odbijeno od tla i okolnih predmeta) pa je globalno (ukupno) zračenje njihov zbroj, odnosno:

$$E_{s\beta} = E_{sb} + E_{sd} + E_{sr} \quad (1)$$

gdje je:

$E_{s\beta}$ – ukupna (globalna) srednja dnevna ozračenost nagnute plohe (kWh/m²dan),

E_{sb} – srednja vrijednost dnevne direktne ozračenosti nagnute plohe (kWh/m²dan),

E_{sd} – srednja vrijednost difuznog ozračenja nagnute plohe (kWh/m²dan),

E_{sr} – srednja vrijednost albeda na nagnutu plohu (kWh/m²dan).

Obzirom da je tema ovog rada proračun solarnih paraboličnih kolektora koji pretvaraju ulaznu solarnu energiju u izlaznu toplinsku energiju, relevantna je samo komponenta direktnog solarnog zračenja E_{sb} , kao najznačajnija za koncentratorske sustave koji prate Sunce (kakav sustav su i parabolični solarni kolektori). Općenito vrijedi odnos:

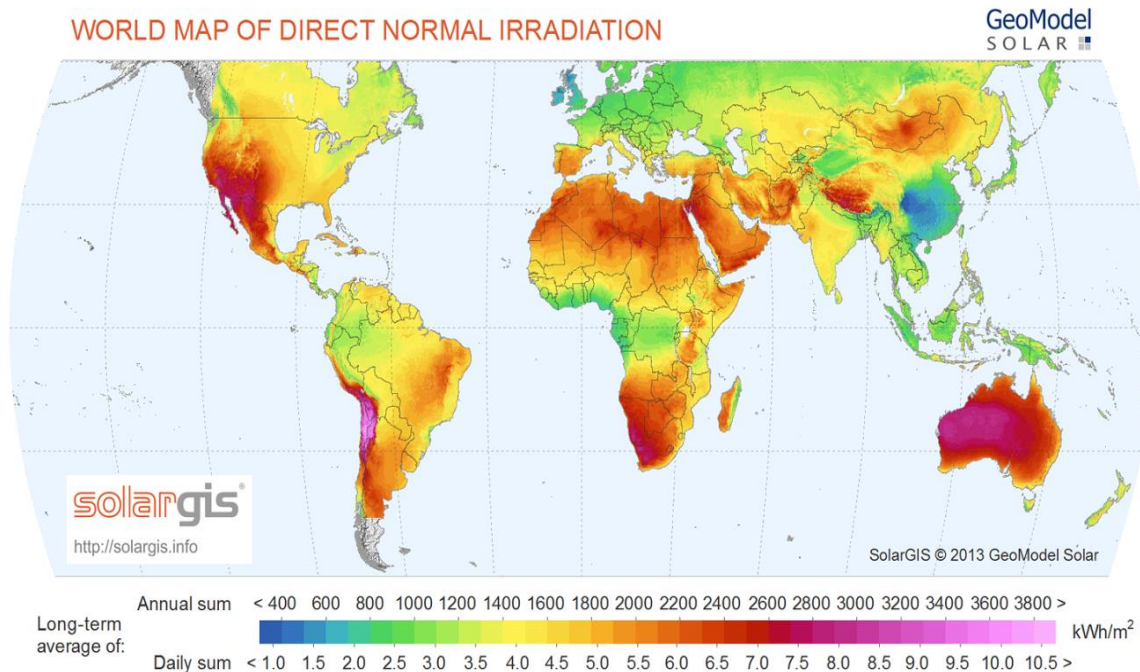
$$E_{s\beta} = E_{sd} + E_{sb} \cdot \sin(\alpha) \quad (2)$$

gdje je α visina Sunca (iznad horizonta) [m].

Iz te jednadžbe se vidi da globalno zračenje na horizontalnu plohu nije i najveće zračenje, nego je to upravo direktno solarno zračenje koje je veće (ili jednako) globalnom solarnom zračenju. Zabunu stvara činjenica da je komponenta direktnog solarnog zračenja na horizontalnu plohu (dakle, razlika je u odnosu na onu plohu koja prati Sunce) manja od globalnog solarnog zračenja jer ono upada na horizontalnu plohu pod kutom, dok je direktna komponenta na horizontalnu plohu manja i zato što u globalno solarno zračenje ulazi i difuzno zračenje.

No, ti se odnosi mijenjaju kad se promatra ploha koja prati Sunce. U tom slučaju (plohe koja prati Sunce, a kakvu plohu i predstavljaju solarni parabolični kolektori), direktna komponenta solarnog zračenja je veća od globalne (osim naravno za lokacije koje su blizu ekvatora, na kojima je globalno zračenje ipak veće od direktnog).

Ovo je i logično jer je direktno zračenje na plohe koje prate Sunce u jutarnjim i večernjim satima veće te one prikupljaju više zračenja, nego horizontalne plohe. Upravo zbog toga su godišnje vrijednosti direktnog solarnog zračenja na plohe koje prate Sunce (kakav slučaj je s paraboličnim kolektorima) veće od vrijednosti globalnog Sunčevog zračenja koje se daje za horizontalnu plohu, a što povećava primjenu koncentratorskih sustava i na lokacije s manjim vrijednostima globalnog zračenja. Na Slici 1. su prikazane vrijednosti direktnog solarnog zračenja iz koje se i vidi da su one veće od globalnog solarnog zračenja.



Slika 1. Direktno solarno zračenje (kWh/m²) [2].

1.2. Povijest paraboličnih žljebastih kolektora

Prvi parabolični žljebasti kolektor konstruirao je Švedsko-Američki inovator John Ericsson 1880. godine, a koji je radio kao parni stroj za pumpanje vode. Prvi patent paraboličnog žljebastog kolektora kojim se generira para, prijavljen je 1907. godine od strane Nijemaca Wilhelma Meiera i Adolfa Remshardta .

No, ono što u povijesnom razvoju zauzima značajno mjesto je izgradnja 45 kW pumpnog postrojenja s paraboličnim kolektorima u Meadi (Egipat) koje je služilo za navodnjavanje, a koje je 1913. godine konstruirao Englez Frank Shuman. Pumpe su bile pogonjene parnim strojem koji je dobivao paru iz paraboličnih žljebastih kolektora, sustav je vidljiv na Slici 2. Kolektorski sustav je bio dužine 62 m i aperture 4 m, ukupne površine 1200 m² i mogao je pumpati 27000 litara vode u minuti. Međutim, unatoč uspjehu tog postrojenja, ono je 1915. godine prestalo s radom zbog izbijanja Prvog svjetskog rata, ali i zbog niske cijene tehnologija na fosilna goriva. Ipak, taj je sustav solarnih paraboličnih kolektora 1917. godine patentiran [3].



Slika 2. Parabolični kolektori primijenjeni u Egiptu, izgrađeni 1913. godine [3].

Sve do 1977. godine nije postojao veći interes za solarne parabolične kolektore kada su američki Departmenet of Energy i njemačko Federalno ministarstvo za razvoj i istraživanje počeli istraživati toplinske strojeve i pumpne sustave s paraboličnim žljebastim kolektorima. Naime, porast cijena fosilnih goriva je očito pobudio interes za solarnim sustavima.

Između 1977. i 1982. godine, tvrtka Acurex je u SAD-u instalirala parabolične žljebaste kolektore kao demonstracijsko postrojenje, čija je ukupna površina aperture bila 10,000 m².

Prva moderna solarna elektrana s paraboličnim kolektorima izgrađena je 1970. godine u Coolidge/Arizona i bila je snage 150 kWe (električne energije).

1981. godine je devet članica International Energy Agency izgradilo demonstracijsko postrojenje snage 500 kW u Plataformi Solar Almeria u Španjolskoj.

Prva privatna investicija u parabolične žljebaste kolektore, ukupne površine 5580 m² puštena je u rad 1983. godine u Arizoni. Taj sustav je proizvodio i toplinsku i električnu energiju, pri čemu je dostizao temperature više od 260 °C.

1983. godine, tvrtke “Southern California Edison” i “Luz International Limited” naručile su prve dvije komercijalne solarne elektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima koje su izgrađene u pustinji Mojave u Kaliforniji. Ove elektrane, nazvane “Solar Electric Generating System” (SEGS) I i II počele su s radom 1985. i 1986. godine. Kasnije je tvrtka Luz potpisala više ugovora koji su doveli do razvoja postrojenja od SEGS III do SEGS IX koja su u početku bila veličine 30 MW, a kasnije i 80 MW. Ukupno je izgrađeno devet postrojenja ukupne snage 354 MW.

Međutim, komercijalna primjena postrojenja s paraboličnim žljebastim kolektorima počinje tek 2007. godine u Nevadi (SAD) kada je pušteno u pogon postrojenje „Nevada Solar One“ snage 64 MW.

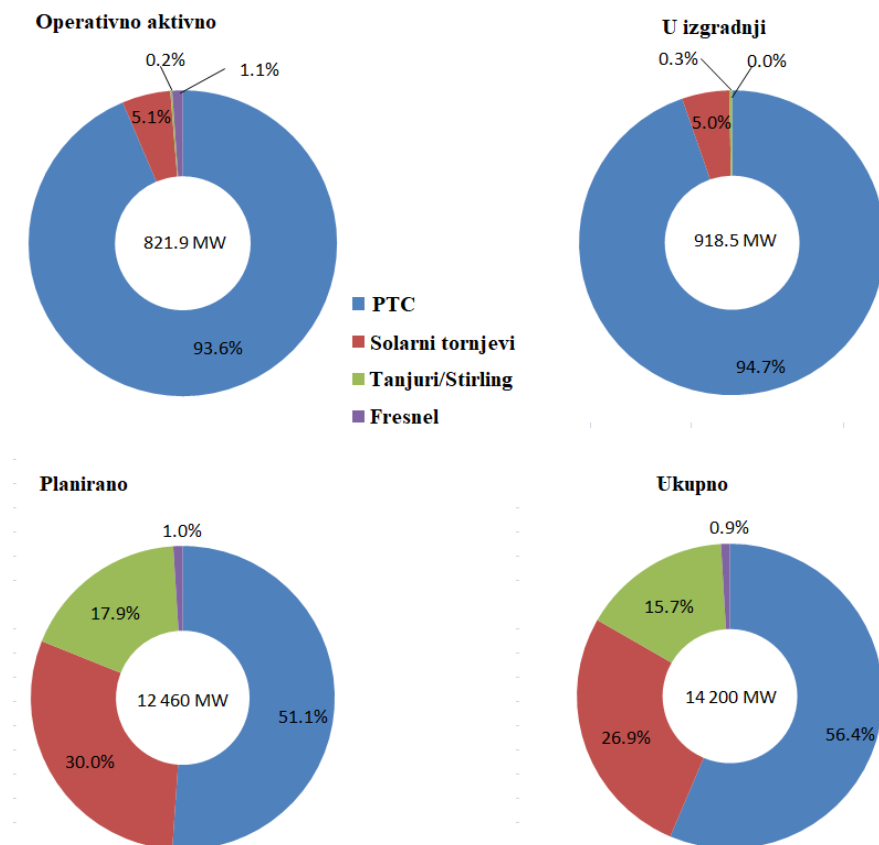
Komercijalna primjena paraboličnih žljebastih kolektora u Europi počinje 2008. godine u provinciji Granada u blizini planina Sierra Nevada (Španjolska) kada su izgrađena postrojenja Andasol 1 i Andasol 2 te kasnije i Andasol 3, od kojih je svako veličine 50 MW.

Danas su postrojenja s paraboličnim žljebastim kolektorima u širokoj primjeni u svijetu te su u tom smislu, osim u SAD-u i Španjolskoj, realizirani projekti i u Indiji, Kini, Egiptu, Alžiru, Maroku i Australiji [4].

2. OPĆI DIO

2.1. Učešće paraboličnih žljebastih kolektora u koncentratorskim termalnim sustavima

Prema [5] učešće paraboličnih žljebastih kolektora (PTC) u odnosu na druge koncentratorske termalne sustave je i najveće, što se vidi na Slici 3. Ono čini čak više od 90% instaliranih kapaciteta i onih koji su u gradnji u odnosu na elektrane s Fresnelovim zrcalima, solarne tornjeve i tanjuraste kolektore sa Stirlingovim motorom (podatak je iz rujna 2010. godine). U smislu planiranih kapaciteta, taj je udio manji i iznosi 51.1%, ali je u zbroju postrojenja koja su u pogonu i izvođenju te onih koja se planiraju, to učešće 56.4%, što sve ukazuje na značaj tehnologije solarnih paraboličnih žljebastih kolektora kao tehnologije koja očito ima prednosti pred drugim koncentratorskim sustavima.



Slika 3. Udio paraboličnih žljebastih kolektora u odnosu na druge termalne tehnologije [4].

2.2. Izvedeni sustavi s paraboličnih žljebastim kolektorima

Dakle, kako je gore navedeno, parabolični žljebasti kolektori čine oko 90% svih koncentrirajućih solarnih sustava. Razlog tomu je što su oni već provjerena tehnologija te su već mnogo puta i na razne načine testirani, što je dovelo do vrlo sofisticirano izvedenih sustava. Države s najvećim potencijalom za izradnju paraboličnih žljebastih kolektora su SAD, Alžir i Španjolska, zbog pogodne godišnje ozračenosti Sunčevom svjetlošću. Realni sustavi sa solarnim paraboličnim žljebastim kolektorima u industriji se najčešće sklapaju na licu mjesta, gdje će biti i postavljeni te pušteni u rad, a prema uredno propisanim skicama za sklapanje.

Parabolični žljebasti kolektori Eurotrough 100 i Eurotrough 150 osmišljeni su i proizvedeni između 1998. i 2002. godine. Eurotrough 100 kolektor dug je 100 m dok je Eurotrough 150 dug 150 m. Zbog veće dužine Eurotrough 150 je ekonomičniji jer su smanjeni materijali potrebni za izgradnju i sklapanje kad gledamo kompletno solarno polje, te je potrebno i manje rotacijskih elemenata.

Eurotrough kolektori (Slika 4.) baziraju se na prostornoj rešetci, s poprečnim sekcijama površine 1.5 x 1.4 m te se uz njih postiže jedna vrlo rigidna struktura. Poprečne sekcije su dodatno pojačane dijagonalnim nosačima i okvirima. U sredini kolektora je "okretni dio" koji je napravljen od metalnih dijelova u obliku ljestava. Eurotrough 150 ima 6 modula koji su spojeni sa svake strane baznog stupa, što u konačnici čini ukupno 12 modula. Eurotrough kolektori testirani su u postrojenju SEGS V u Kaliforniji, te su pokazali 10% veću efikasnost u odnosu na neke prethodnike. Ovakvi kolektori se proizvode pod komercijanim nazivom SKAL-ET te se koriste u postrojenjima Andasol u Španjolskoj i Kuraymat u Egiptu.



Slika 4. Eurotrough kolektor u solarnoj elektrani Plataforma Solar de Almería [6].

ENEA kolektori su proizvod talijanske državne agencije za nove tehnologije te su instalirani na Siciliji (Italija), a odlikuju se time što se kao radni fluid u postrojenjima koristi tekuća sol. Konstrukcija nije bazirana na prostornoj rešetki kao kod Eurotrough kolektora, nego na torzijskoj cijevi. Ovakvi kolektori dugi su otprilike 100 m te imaju širinu aperture od 5.76 m. SGX-1 i SGX-2 dio su američkog razvojnog programa što se tiče paraboličnih žljebastih solarnih kolektora. Kolektori su izrađeni većinom od ekstrudiranog aluminija. Struktura se bazira na prostornoj rešetki koja se izrađuje na temelju tehnologija koje se koriste pri snažnim konstrukcijama mostova i zgrada. Prednost ovakve stukture je što je vrlo lagana i zahtjeva vrlo malo dijelova za pričvršćivanje. Širina otvora je 5.77 m, moduli imaju dužinu 12 m a cijeli sklop postrojenja s modulima ima dužinu od 100 m do 150 m. SGX-1 uspješno je instaliran u Saguario postrojenju u Arizoni, snage od 1 MW.

Heliotrough kolektori njemačke tvrtke Flagsol GmbH (Slika 5.), koriste torzijsku cijev kao središnji stabilizirajući element i interesantni su jer su jedni od prvih kolektora koji su imali relativno veću širinu aperture u odnosu na prethodnike. Širina aperture je 6.77 m i stoga analogno je i veći promjer apsorpcijske cijevi i to od 90 mm. Jedan modul ima dužinu 19.1 m a cijeli sklop kolektora se sastoji od 10 modula i ima ukupnu dužinu 191 m. Posebne značajke ovog kolektora su i to što nema udubljenja za zrcala na potpornim stupovima. Ogledala su postavljena kontinuirano na ležeću strukturu, odnosno montirana direktno na strukturu koja leži na torzijskoj cijevi. To u konačnici povećava efikasnost u korištenju prostora na kolektoru te izvan njega, kao i ispod samog kolektora. Također kolektor ima i utege za protutežu koji se koriste za namještanje centra gravitacije kolektora unutar pratećih pomičnih osi. Ovakvi kolektori dio su SEGS postrojenja u Kaliforniji a testirani su 2009. godine u realnim uvjetima.



Slika 5. Flagsol Heliotrough kolektor [7].

Tvrtka Solarite GmbH razvila je SL4600 kolektor (Slika 6.), koji ima malo drugačiju strukturu od ranije spomenutih kolektora. Središnji dio izrađen je od finih staklenih vlakana i pjene na bazi smole, dok su zrcala napravljena od tankog srebra. Uloga prostorne rešetke sa stražnje strane je da preuzima opterećenje sustava. Ovi kolektori korišteni su u postrojenju snage 5 MW, 2011.godine u Kanchanaburiju na Tajlandu. SL4600 bio je prvi parabolični žljebasti solarni kolektor s direktnom generacijom pare u postrojenju.



Slika 6. Solarite GmbH SL4600 kolektor [4].

Pregled značajnijih paraboličnih žljebastih kolektora, s osnovnim tehničkim podacima dan je u Tablici 1. Danas je cilj dobiti što efikasnije kolektore, kako bi oni bili ekonomski što isplativiji kako bi lakše privukli ulagače.

Tablica 1. Značajniji parabolični žljebasti kolektori i njihove specifikacije [4].

Kolektor	LS-2	LS-3	Euro trough	ENEA	SGX-2	Sener trough	Helio trough	Sky trough	Solel / Siemens LS6	Solarite SL 4600
Noseća struktura	Rotirajuća cijev	“V-truss” nosač	Rotirajuća kutija	Rotirajuća cijev	Aluminijska prostorna rešetka	Rotirajuća cijev	Rotirajuća cijev	Aluminijska prostorna rešetka	Rotirajuća cijev	Potporni elementi na bazi staklenih vlakna i smole
Godina	1985	1989	2002	2004	~ 2005	2005	2009	2010		2010
Apertura [m]	5	5-7	5.76	5.76	5.77	5.76	6.77	6	5.77	4.60
Duljina kolektora [m]	47	99	100-150	100	100-150	150	191	115	99	
Duljina modula [m]		12	12	12.5	12	12	19.1	14		12
Obodni kut [°]	80	80	80	~ 77		80	89.5	82.5		
Žarišna linija [m]	1.49	1.71	1.71	1.8		1.70	17.10	1.71		
C _G	71	82	82	75-80	82	~ 80	76	75		
Postrojenje	SEGS	SEGS	SEGS V, Andasol 1,2,3/ Španjolska Kuraymat/ Egipat	Archemide power plant/Italija	Saguaro, Nevada Solar One	Extresol 1,2/Španjolska	Test SEGS	Test SEGS	Lebrija/ Španjolska	Kanchanaburi/Tajland
Promjer absorbera [m]	0.07	0.07	0.07		0.07	0.07	0.09	0.08		

Kod postrojenja koja imaju integrirane parabolične žljebaste Sunčeve kolektore nužan je fluid za prijenos topline. Njegov zadatak je da akumulira toplinsku energiju dobivenu unutar kolektora i transportira je dalje u postrojenje, prema turbini i kondenzatorima. Dva su načina kako toplina može biti transferirana dalje u postrojenje. Prvi način je da se koristi poseban fluid, preko kojeg se toplina transferira na radni fluid *Rankineov* ciklusa. Drugi način je da se para za *Rankineov* ciklus generira direktno u apsorberu, te se transportira na turbinu. Prva verzija naziva se engl. “*indirect steam generation*”, a druga “*direct steam generation*”. *Rankineov* ciklus je fundamentalni operacijski ciklus gotovo svih vrsta elektrana, gdje se radni fluid kontinuirano isparava i kondenzira te se toplina pretvara u mehanički rad. *Rankineov* ciklus sastoji se od 4 koraka: (i) *izentropna kompresija radnog fluida* (ii) *izobarno isparavanje* (iii) *izentropna ekspanzija radnog fluida* (iv) *izobarna kondenzacija* [8,9].

Za optimalno izvršavanje zadataka vezanih za opskrbu električnom energijom, postrojenja kojih su dio parabolični žljebasti kolektori, moraju imati odabrane i podešene brojne parametre prije same izgradnje. Jedno od pitanja je da li je svrha postrojenja proizvoditi temeljnu, srednju ili vršnu energiju. Također, važno je da li će postrojenje imati dopunski izvor energije na bazi fosilnih goriva.

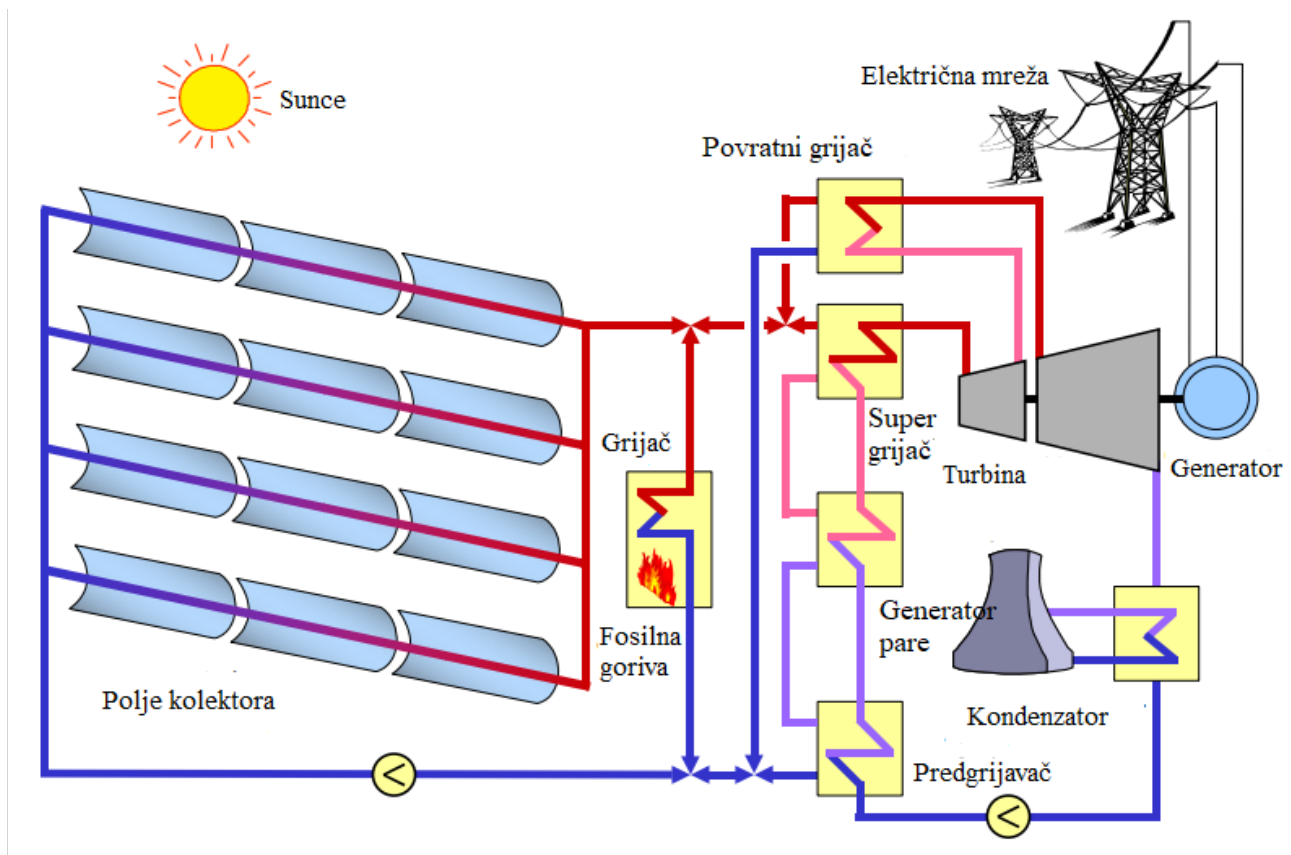
Solarno polje je veličina područja gdje će solarni kolektori biti montirani. Veličina ovisi o vrsti projekta kojim se solarna elektrana integrira. Malo solarno polje, koje je jeftinije, podrazumijeva da se nazivna snaga postiže samo u nekim slučajevima, odnosno kada je direktno Sunčevo zračenje koje pada na kolektore blizu maksimuma. Veće solarno polje osigurava da se nazivna snaga postiže mnogo češće te da se izlazna energija povećava. Međutim, veće solarno polje je naravno i skuplje, pri čemu se događa da se sva proizvedena energija ne iskorištava, bez obzira na činjenicu da je to polje radilo u jako dobrim uvjetima direktnog Sunčevog zračenja. Optimalna veličina solarnog polja može se definirati kao ekonomski optimum između vrlo velikog i vrlo malog solarnog polja.

U svrhu osiguravanja kontinuirane opskrbe potrošača energijom, dnevni višak energije koju proizvedu parabolični žljebasti kolektori se skladišti pomoću rastaljenih soli (promjenom faze) koje čini eutektička smjesa od 60% NaNO_3 i 40% KNO_3 za periode preko noći.

Međutim, ono što je posebno važno istaknuti je činjenica da je unatoč dnevnom skladištenju toplinske energije, solarne termalne elektrane ne mogu samostalno osigurati kontinuiranu proizvodnju energije jer svaki dan kroz godinu nije sunčan. Dakle, radi se o

interminiranoj proizvodnji energije. Upravo zbog toga, solarnim termalnim elektranama se danas ipak dodaju fosilna goriva (ugljen, nafta, plin) u određenom postotku, a sve kako bi se osigurala kontinuirana proizvodnja energije. To pak znači i da se za današnje solarne elektrane ne može reći da su u potpunosti “*zeleni izvor energije*”.

Solarna termalna elektrana s paraboličnim žljebastim kolektorima i dodatnim izvorom energije (fosilna goriva), prikazana je na Slici 7.



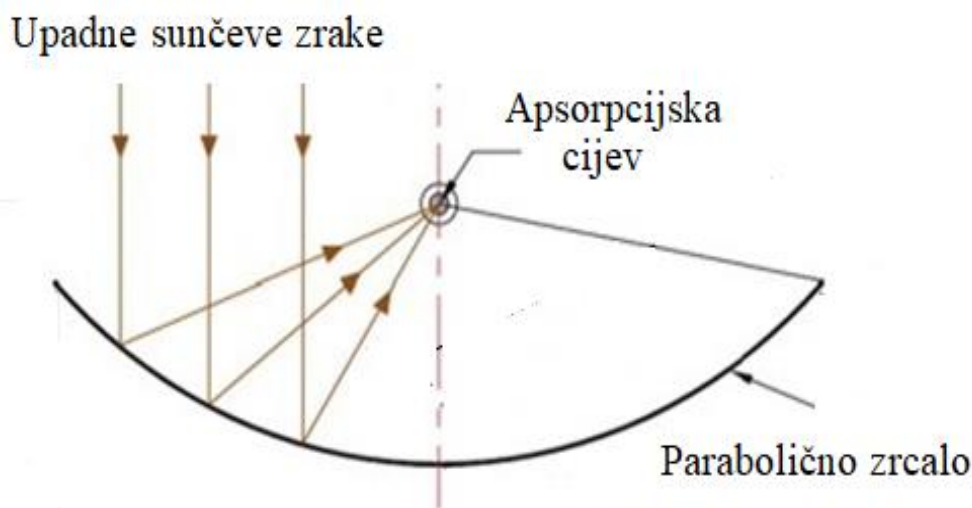
Slika 7. Princip solarne termalne elektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima i dodatnim izvorom energije (fosilna goriva) [10].

Turbina je vrsta energetskeg stroja koji stalnim protokom radnog fluida kroz sustav statorskih i rotorskih lopatica pretvara toplinsku energiju radnog fluida, prvo u kinetičku energiju a zatim vrtnjom rotora u mehanički rad. Generator pak nastavno na to, pretvara mehaničku energiju u električnu energiju koja se dalje prenosi prema električnoj mreži potrošača [11]. Radni fluid se grije prolaskom kroz kanale solarnih kolektora, koji se nalaze unutar polja kolektora

(Slika. 7.), te ide dalje prema turbini. Također, na turbinu se dovodi pregrijana para koja se dobiva prolaskom kroz predgrijač i generator pare, dok se dodatno zagrijavanje provodi u grijaču. U današnjim komercijalnim solarnim elektranama, grijač je i dalje standardni dio postrojenja, a upravo se u njemu toplinska energija dobiva izgaranjem fosilnih goriva (ugljen, nafta ili zemni plin). Upravo taj konvencionalni postupak ne pridonosi principu “*zelenih izvora energije*”. Dio fluida i pare se povratnim grijačem vraća u sustav te se pumpa natrag prema polju kolektora, s ciljem da opet prođe kroz njega.

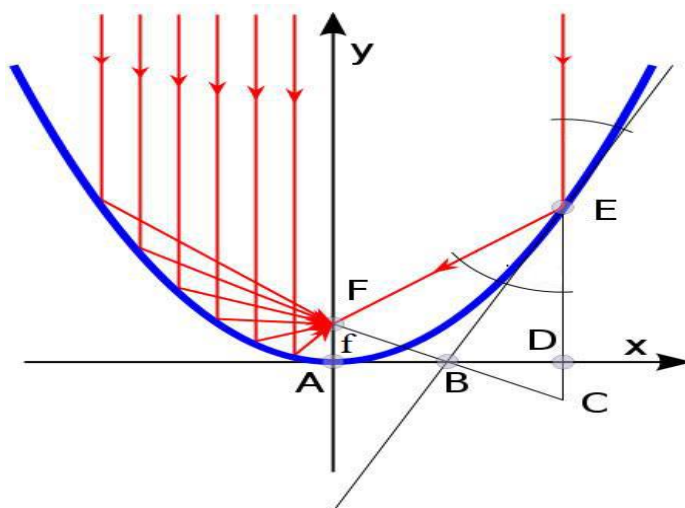
2.3. Geometrija paraboličnog kolektora

Parabolični žljebasti kolektori pretvaraju solarnu energiju u toplinsku energiju. Sastoje se od *paraboličnog zrcala (reflektora)* koje reflektira svjetlost na *apsorpcijsku cijev* kroz koju struji *radni fluid*, kao što je vidljivo na Slici 8.



Slika 8. Skica paraboličnog žljebastog kolektora.

Poprečni presjek paraboličnog zrcala čini *geometrijsku krivulju parabole*, Slika. 9.

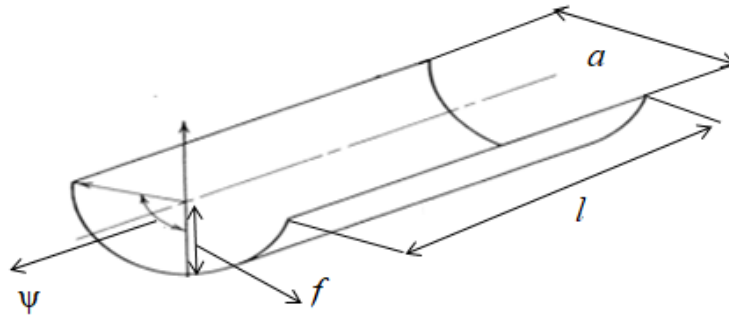


Slika 9. Put solarnih zraka u paraboličnom reflektoru [4].

Parabola paraboličnog zrcala ima žarišnu liniju f , koja se nalazi između točaka F (žarište) i A (vrh parabole), a koje su locirane na polovištu paraboličnog presjeka, koje se u ovom slučaju poklapa s ordinatom. Sunčeve zrake koje padaju paralelno na optičku ravninu, u ovom slučaju na apscisu (Slika 9.), reflektiraju se tako da prolaze kroz žarišnu točku F [4]. Direktno Sunčevo zračenje se dakle reflektira od paraboličnog zrcala prema žarišnoj točki F , koja se u realnim sustavima nalazi u središtu apsorpcijske cijevi (obično na polovištu promjera cijevi). Na taj način se dobiva visoka koncentracija solarnog zračenja na apsorpcijskoj cijevi.

Duljina žarišne linije f predstavlja udaljenost između žarišta i tjemena parabole. Upravo varijabla f određuje matematičku funkciju parabole analitičkim izrazom:

$$y = \frac{1}{4f} x^2 \quad (3)$$



Slika 10. Parametri paraboličnog žljebastog kolektora.

Duljina žlijeba l je varijabla na koju možemo lako utjecati, te ovisi isključivo o tome koju duljinu samog žljebastog kolektora odaberemo. **Širina aperture** a predstavlja dužinu koja se prostire između dva ruba paraboličnog zrcala.

Obodni kut ψ , kut koji zatvara **žarišna duljina** f i linija koja spaja žarište i rub ogledala, igra važnu ulogu pri određivanju geometrije paraboličnih zrcala. On određuje oblik samog paraboličnog zrcala, što znači da su poprečni presjeci paraboličnih zrcala s istim obodnim kutem slični. Poprečni presjek jednog paraboličnog zrcala s određenim obodnim kutem može biti podudarajući s drugim poprečnim presjekom drugog paraboličnog zrcala s istim obodnim kutem, uz jednolično uvećavanje i umanjivanje same površine presjeka. Dakle, ako je od interesa samo oblik presjeka a ne i veličina, dovoljno je geometrijski odrediti obodni kut ψ .

Iz dva od tri sljedeća parametra: **žarišne duljine** “ f ”, **širine aperture** “ a ” i **obodnog kuta** “ ψ ”; može se odrediti cijeli poprečni presjek paraboličnog žlijeba. To znači da su dovoljna dva parametra da bi se izračunao treći koji se može izraziti kao funkcija omjera širine aperture s žarišnom duljinom:

$$\tan\psi = \frac{\frac{a}{f}}{2 - \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{a}{f}\right)^2} \quad (4)$$

$$\frac{a}{f} = -\frac{4}{\tan\psi} + \sqrt{\frac{16}{\tan^2\psi} + 16} \quad (5)$$

Kod realnih sustava vrijednosti samih varijabli su nešto drugačije u odnosu na geometrijsku teoriju. Obodni kut ne bi trebao biti ni prevelik, a niti premalen. On je vrlo važna konstruktivna značajka kolektora jer ima utjecaj na omjer koncentracije, kao i na totalno ozračenje po metru apsorpcijske cijevi. Vrlo je važno proračunati optimalni obodni kut kako bi efikasnost sustava bila što veća.

Ako se razmotre idealna zrcala, zanemarujući pogreške, situacija je sljedeća: ako je obodni kut jako malen, onda su zrcala vrlo uska te je očito da će se povećati zračenje projicirano, kako na žarišnu točku tako i na aporpcijsku cijev. Ako je pak obodni kut jako velik, tada je put reflektiranog zračenja iz unutarnjeg djela zrcala vrlo dug, te je širenje snopa veće, a koncentracijski omjer se reducira. Dakle, zrcala s manjim obodnim kutom i istom širinom otvora, davat će veći koncentracijski omjer.

Također, važno je imati malu udaljenost između apsorpcijske cijevi i zrcala zbog određenih geometrijskih nepravilnosti zrcala. Ako je velika udaljenost između zrcala i žarišne linije, što se događa kada su vrlo mali ili vrlo veliki obodni kutovi, veće su i geometrijske nepravilnosti odnosno pogreške. Kod prevelikih obodnih kutova vanjski dijelovi sustava imaju manje energetske doprinose, što je ekonomski neisplativo. Stoga je važno izbjeći ovu situaciju.

Prema proračunima, optimalni obodni kut ψ kod paraboličnih žljebastih kolektora iznosi 80° . Optimalna širina aperture je 6 m kao i žarišna linija dužine otprilike 1,75 m. Kolektori, odnosno duljina žlijeba bi u pravilu trebala biti od 12 do 14m, kako bi dobili najoptimalnije iskorištenje [4].

Vrlo je važno i kolika je površina aperture (otvora) paraboličnog žlijeba. Pri određenom direktnom Sunčevom zračenju i danoj poziciji Sunca, površina otvora određuje skupa s prethodna dva parametra ukupnu količinu sakupljenog zračenja. Površina otvora paraboličnog žlijeba računa se po sljedećoj formuli

$$A_{ap,c} = a \cdot l \quad (6)$$

$A_{ap,c}$ - površina aperture paraboličnog žljebastog kolektora [m^2],

a - širina aperture paraboličnog žljebastog kolektora [m],

l - duljina aperture paraboličnog žljebastog kolektora [m].

2.4. Omjer koncentracije

Omjer koncentracije C predstavlja ključni parametar paraboličnih kolektora jer se na osnovi njega određuje radna temperatura, a time i efikasnost cijelog termoenergetskog sustava. Dvije su definicije tog parametra: *Optički omjer koncentracije* i *Geometrijski omjer koncentracije*.

Optički omjer koncentracije C_{opt} se definira kao omjer prosječnog toka solarnog zračenja integriranog po površini apsorpcijske cijevi kolektora G_{im} i direktnog solarnog zračenja koje upada na na površinu aperture kolektora $G_{b,ap}$, odnosno:

$$C_{opt} = \frac{G_{im}}{G_{b,ap}} \quad (7)$$

Geometrijski omjer koncentracije C_G se definira kao omjer koji predstavlja omjer površine aperture kolektora $A_{ap,c}$ i površine apsorpcijske cijevi $A_{ap,r}$, odnosno:

$$C_G = \frac{A_{ap,c}}{A_{ap,r}} \quad (8)$$

Dakle, u slučaju optičkog omjera koncentracije ukupan tok solarnog zračenja koje dolazi na apsorpcijsku cijev (u brojniku izraza 7) je puno veći od toka solarnog zračenja koje upada na aperturu apsorpcijske cijevi (u nazivniku izraza 7); dok je kod geometrijskog omjera koncentracije sama površina aperture kolektora (u brojniku izraza 8) puno veća od površine apsorpcijske cijevi (u nazivniku izraza 8).

Obzirom da se površina apsorbera može aproksimirati pravokutnikom (iako se radi o okrugloj cijevi na koju upada koncentrirano solarno zračenje) površine $d \cdot l$ (pri čemu “ d ” označava promjer apsorpcijske cijevi); onda se geometrijski omjer koncentracije može izraziti formulom:

$$C_G = \frac{a \cdot l}{d \cdot l} = \frac{a}{d} \quad (9)$$

Maksimalni srednji omjer koncentracije žljebastih paraboličnih kolektora iznosi 107.5, dok kod realnih sustava geometrijski omjer koncentracije iznosi 82.

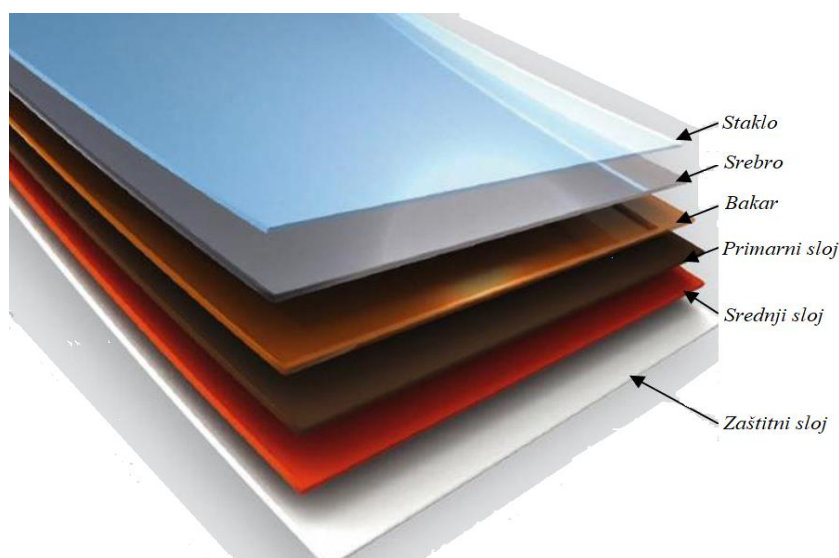
2.5. Konstrukcijski materijali paraboličnog zrcala

Kod konstrukcijskih materijala paraboličnog zrcala, najvažnija su njihova reflektirajuća svojstva. Naravno, podrazumijeva se da je bolje da reflektivnost bude što veća. Reflektivnost površine je broj koji pokazuje koliki je dio upadne svjetlosti reflektiran od površine. Stoga, solarna reflektivnost pokazuje, koliki dio solarne energije je reflektiran od površine zrcala. Općenito, reflektivnost je različita za različite valne duljine solarnog zračenja, tako da je ona specifična za određenu valnu duljinu solarnog zračenja.

Kod proizvodnje paraboličnih žljebastih kolektora danas se najviše koriste parabolična zrcala premazana srebrenim premazom. Praktički svi komercijalni parabolični žljebasti kolektori koriste premaze na bazi srebra. Ova vrsta ogledala pokazala se veoma pouzdanom te i nakon 10 godina parabolično zrcalo ne gubi reflektivnost. Staklo za parabolično zrcalo većinom se proizvodi metodom plutajućeg stakla, gdje se rastaljeno staklo kontinuirano dovodi u kupelj na bazi rastaljenog kositra. Specifičnim metodama uz srebrene premaze, mogu se postići vrlo visoke geometrijske preciznosti u paraboličnim zrcalima. Kao primjer, njemačka kompanija Flabeg, koja

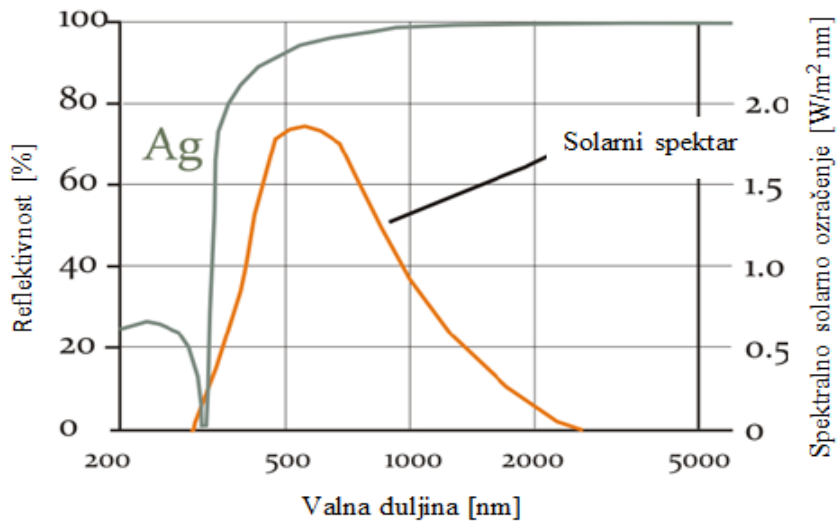
proizvodi zrcala, navodi devijaciju nagiba od samo 0.132° . Upravo zbog tako male devijacije kuta nagiba, takvim zrcalima se postiže visok “faktor presijecanja” koji se definira kao postotak zračenja reflektiranog od zrcala, koje dolazi do apsorpcijske cijevi. Primjenom kod Eurotrough kolektora, taj faktor iznosi 99.99% za apsorpcijsku cijev promjera 70 mm (kakav promjer se općenito koristi kod većine komercijalnih apsorpcijskih cijevi) te 95.5% za apsorpcijske cijevi promjera 40 mm.

Zrcala imaju višeslojnu strukturu koja pruža kompatibilnost te dobro prijanjanje na strukturu paraboličnog žljebastog kolektora kao na Slici 11.



Slika 11. Višeslojna struktura zrcala [4].

Prvi sloj ispod stakla je srebreni reflektorajući sloj. Na slici 12. prikazana je ovisnost reflektivnosti srebra o valnoj duljini reflektirane svjetlosti. Kako se vidi (spektar solarnog zračenja je označen narančastom bojom), samo na malim valnim duljinama (odnosno vrlo visokim frekvencijama – UV područje), ta je reflektivnost vrlo relativno mala, dok je na većim valnim duljinama (vidljivo i infracrveno zračenje) ta reflektivnost vrlo visoka.



Slika 12. Reflektivost srebra [4].

Nakon srebrenog sloja premaza, dolazi zaštitni sloj od bakra. Na bakar se nastavlja tri epoksidna sloja kako slijedi: primarni sloj, srednji sloj i zadnji zaštitni sloj. U većini komercijalnih slučajeva, prvi i drugi sloj sadrže određeni postotak olova. Danas se radi na tome da se u potpunosti izbace bakar i olovo iz slojeva. Ukupna debljina ove višeslojne strukture zrcala je 4 do 5 mm.

Većina kolektora na bazi srebrenih premaza, nisu konstruirana u jednoj cjelini nego su sastavljena od više malih modula. Kolektor “Eurotrough”, koji je dug 12m i širok 5.77m, sastoji se od 28 modula, raspoređenih u 4 horizontalna reda i 7 vertikalnih kolona. Ukupna reflektirajuća površina ovog zrcala iznosi 76.44 m².

Sve se više radi na tome da se standardni materijali (sa srebrenim slojem) zamijene alternativnim materijalima kako bi se smanjili troškovi paraboličnih žljebastih solarnih kolektora. National Renewable Energy Laboratory (NREL), (Golden, Colorado, SAD) je devedesetih godina razvio višeslojne polimerne filmove premazane srebrom kao alternativni reflektirajući materijal. Prednosti ovakvih materijala za kolektore su što se ubrzava proces proizvodnje dijelova za kolektore, kao i proces sklapanja samih kolektora. Zrcala proizvedena na temelju ove tehnologije mogu se staviti u vodilice paraboličnog oblika. Velika prednost je i što su zrcala fleksibilnija i nisu podložna pucanju. Reflektivnost ovakvih zrcala je u pravilu oko 94%.

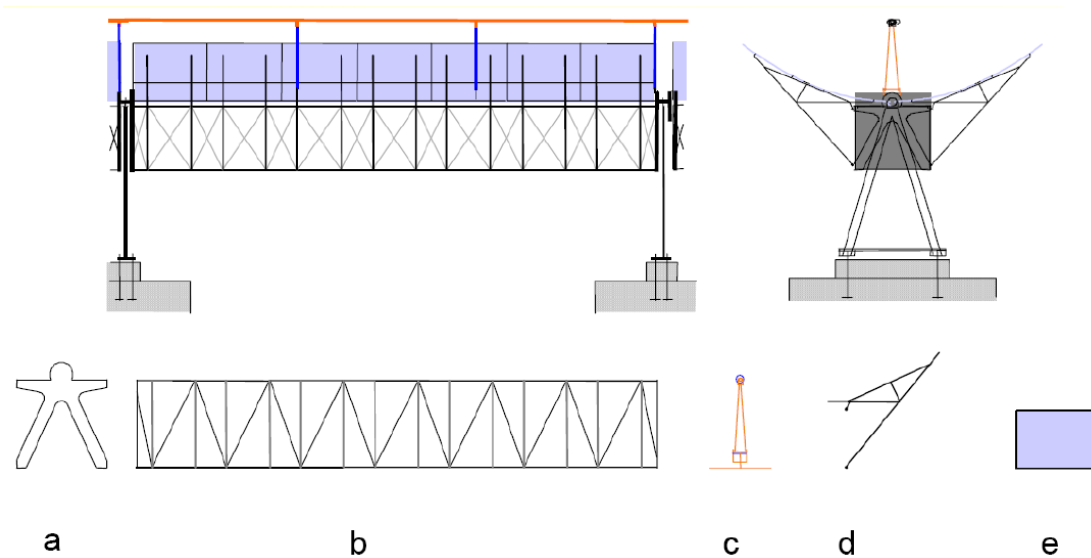
Postoje i zrcala na bazi aluminijskog reflektirajućeg sloja te anodiziranog sloja ispod i iznad aluminijskog sloja. Uz to postoje još i zaštitni slojevi u takvim kolektorima. S obzirom da aluminij ima slabiju reflektivnost solarnog spektra, za razliku od srebra, reflektivnost zrcala na bazi aluminijskog sloja nešto je manja, odnosno oko 90%.

2.6. Nosiva konstrukcija

Nosiva konstrukcija paraboličnih žljebastih kolektora ima funkciju nošenja zrcala, njihovog usmjeravanja prema Suncu te davanja stabilnosti samim kolektorima. Ona mora biti velike čvrstoće jer bi kod devijacija od idealnog paraboličnog oblika moglo doći do gubitka optičke efikasnosti u sustavu. Također, vrlo je važno da ne dođe do deformacije zbog opterećenja vjetrom. Stoga konstrukcija mora biti napravljena tako da svede spomenute geometrijske devijacije na minimum. Velika čvrstoća omogućuje i veće duljine kolektora, što znači da se može smanjiti broj stupova i mehanizama za usmjeravanje zrcala, a što u konačnici smanjuje i troškove postrojenja.

Nosiva konstrukcija kolektora najčešće se sastoji od *glavnog dijela*, koji je napravljen u obliku prostornog okvira ili od cijevnih konstrukcija. Najčešće korišteni materijali su željezo ili pojačane aluminijske legure. Ostali elementi nosive konstrukcije su: *dijelovi za podupiranje ogledala*, *držač apsorbira* (HCE element), *adapteri za montiranje na stupove*, *stupovi* i *temelji*.

Na slici 13. prikazani su dijelovi nosive konstrukcije paraboličnih žljebastih kolektora: (a) prednji i stražnji nosači koji se montiraju na stupove, (b) prostorna struktura, (c) držač apsorbira, (d) konzola nosača, (e) modul zrcala.

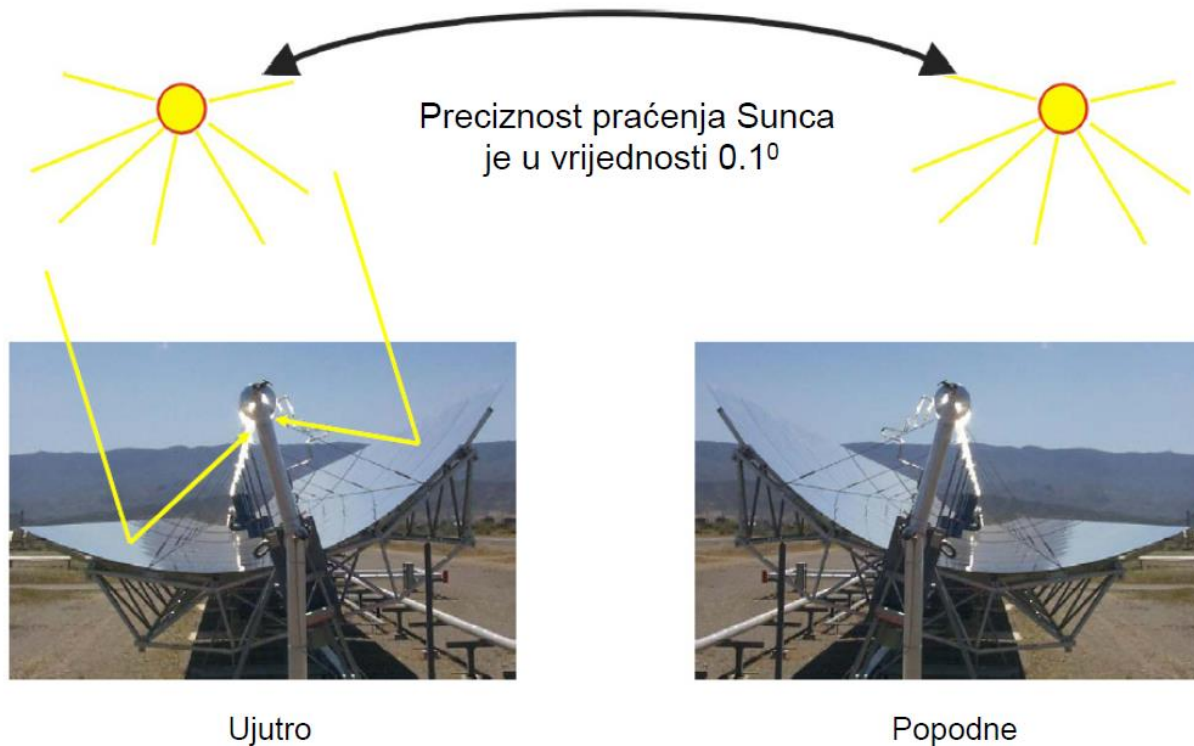


Slika 13. Dijelovi nosive konstrukcije [4].

2.7. Praćenje Sunca

Kao i svi drugi visokotemperaturni koncentrirajućih solarni sustavi, parabolični žljebasti kolektori moraju pratiti Sunce kako bi se postigla kontinuirana koncentracija solarnog zračenja na apsorber. Kao linijski koncentracijski sustvi, parabolični žljebasti kolektori imaju jednoosni prateći sistem. Teorijski kolektori na solarnom polju u postrojenju mogu imati bilo koju horizontalnu orijentaciju te je praćenje Sunca uvijek moguće. Međutim, preferira se postavljanje kolektora u smjeru sjever-jug, uz praćenje Sunca u pravcu od istoka prema zapadu.

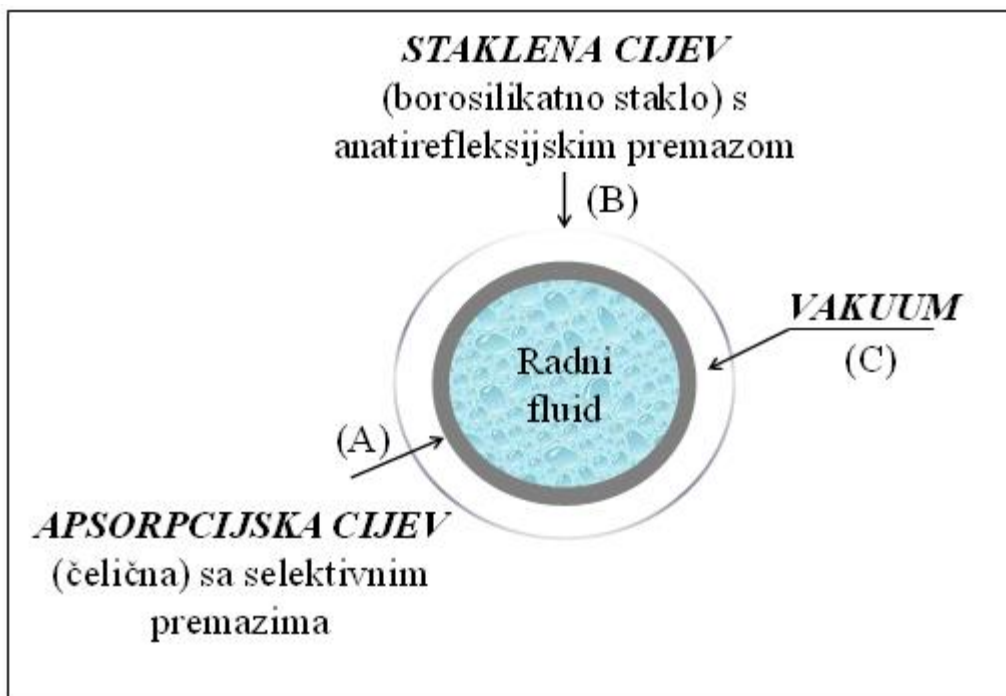
Pri tome je važno naglasiti da je praćenje Sunca paraboličnim žljebastim kolektorima vrlo precizno i da se te vrijednosti kreću 0.1° , a sve zato da bi se što bolje iskoristilo direktno solarno zračenje, Slika 14.



Slika 14. Praćenje Sunca u smjeru istok-zapad.

2.8. Apsorpcijska cijev

Uloga apsorpcijske cijevi je pretvaranje zračenja koje dolazi na nju u toplinu, transport toplinu u unutrašnjost cijevi, a toplina se zatim putem radnog fluida vodi dalje do izmjenjivača topline ili direktno prema turbinama. Na slici 15. je prikazana (A) apsorpcijska cijev koja je od čelika sa selektivnim premazima i najčešće vanjskog promjera od 70 mm. Unutar apsorpcijske cijevi je radni fluid koji mogu biti ulja, ali u tzv. *Direct Steam Generation* (DSG) tehnologiji je to demineralizirana voda koja se nakon isparavanja vodi direktno do turbine. Razlog zašto bi se sintetička ulja trebala izbaciti iz upotrebe kao radni fluid, je što postoji rizik za tlo i vode ako se dogodi istjecanje fluida u okoliš, što ne pridonosi “*zelenim izvorima energije*”. Istraživanja pokazuju da istjecanje fluida iz paraboličnih žljebastih sustava može uzrokovati više štete nego kod npr. solarnih tornjeva [12]. Oko čelične cijevi se nalazi (B) staklena cijev od borosilikatnog stakla s antirefleksivnim premazom, dok se između čelične apsorpcijske cijevi i staklene cijevi nalazi (C) vakuum kao najbolji izolator [13].



Slika. 15. Apsorpcijska cijev paraboličnog žljebastog kolektora (slika preuzeta od K. Margeta).

Apsorpcijska cijev mora zadovoljiti određene geometrijske i fizičke uvjete. Reflektirano zračenje mora doći na površinu apsorpcijske cijevi što iziskuje određene geometrijske zahtjeve. Zračenje mora biti pretvoreno u toplinu u što većem postotku, dok optički i termalni gubitci na površini apsorpcijske cijevi moraju biti što manji. Shodno tome, primjenjuju se posebno izrađeni slojevi kao i termalni izolatori. Što se gubitaka tiče oni se većinom dijele na radijacijske, konvekcijske i kondukcijske gubitke.

Kako bi se postigli što manji gubitci a što veća apsorpcija, apsorpcijska cijev mora imati veliku apsorpciju u području vidljive svjetlosti dok emisivnost mora biti niska u infracrvenom području. Prema Kirchoffovu pravilu $\alpha_\gamma = \varepsilon_\gamma$, apsorpcija i emisivnost tijela su za specifičnu valnu duljinu identični. Međutim, to se odnosi samo za istu valnu duljinu. Za različite valne duljine, apsorpcija i emisivnost su različiti. U slučaju apsorpcijske cijevi, apsorpcija mora biti visoka za područje Sunčeve svjetlosti $250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 2500 \text{ nm}$, emisivnost mora biti niska za infracrveno područje $3000 \text{ nm} \leq \lambda \leq 50000 \text{ nm}$. Takve zahtjeve fizički je lako izvesti i to posebnim selektivnim slojevima. Obično su ti slojevi na bazi *cermeta* (“cermet” – kombinacija keramičkih (cer) i metalnih (met) materijala), materijala koji se sastoji od metalnih nano-čestica koje su ugrađene u keramičku bazu. Prvi sloj obično je reflektirajući sloj, napravljen od metala

koji ima visoku reflektivnost u infracrvenom području (bakar, aluminij, molibden). Sljedeći sloj je sloj cermeta, koji može sadržavati određene primjese metala. Zadnji sloj obično je metalni i osigurava dobru adheziju slojeva na glavnu konstrukciju apsorpcijske cijevi.

Apsorpcijska cijev mora imati odgovarajući promjer (najčešće 70 mm) kako bi se postigao tzv. “*visoki faktor presjecanja*” koji predstavlja omjer ukupno reflektiranog zračenja i zračenja koje pada na površinu apsorpcijske cijevi. S druge strane, apsorpcijska cijev ne bi trebala imati preveliki promjer jer bi tada dolazilo do značajnih toplinskih gubitaka.

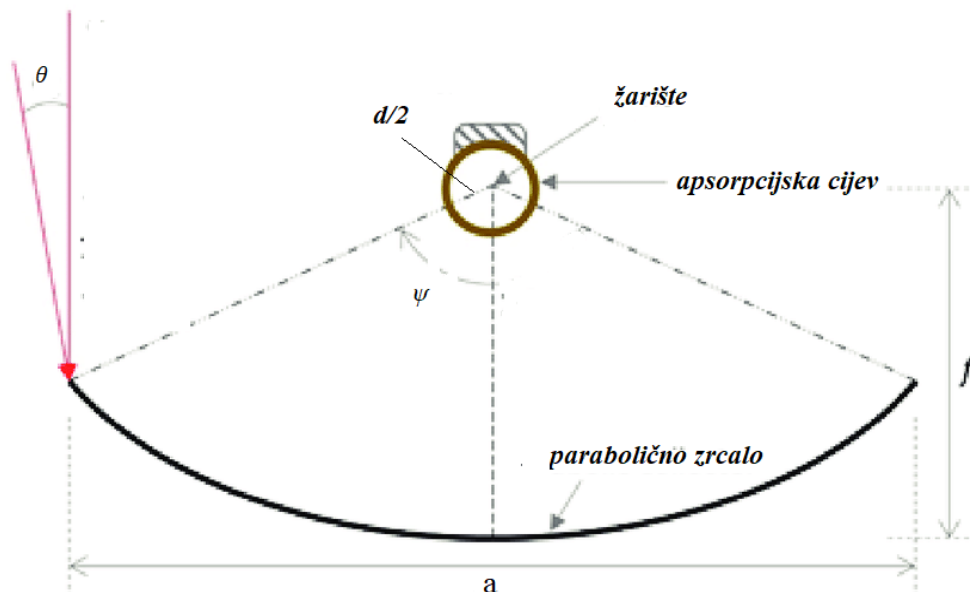
Svaki apsorber ima određenu efikasnost koja opada zbog optičkih i toplinskih gubitaka koji su neizbježni u realnim sustavima. Optički gubici većinom se očituju na staklenoj oblozi ali i na samom apsorberu. Staklena cijev ima ograničenu transmitaciju, tako da se samo dio zračenja reflektira od nje. Apsorberska cijev ima pak ograničenu apsorpciju. Stoga se samo dio zračenja reflektira kao i u slučaju staklene cijevi. Gubitak efikasnosti zbog optičkih gubitaka otprilike iznosi od 8,8% pa do 12,1%. Toplinskim gubitcima pridonose radijacija, konvekcija i kondukcija.

3. PRORAČUN PARABOLIČNIH ŽLJEBASTIH KOLEKTORA

3.1. Proračun efikasnosti

Kad se govori o efikasnosti paraboličnih žljebastih solarnih kolektora, mora se uzeti u obzir mnogo faktora, pogotovo ekonomskih, jer je cilj da kolektori u konačnici budu dio elektroenergetskog postrojenja. Efikasnost kolektora mora biti zadovoljavajuća kako bi postrojenje pokretano na solarnu energiju ili djelomice pokretano na solarnu energiju imalo što veći prinos električne energije. Kako bi se dobila što veća efikasnost a time i isplativost ovakvih sustava, potrebno je proračunom dobiti optimalne varijable. Upravo te varijable se mogu dobiti detaljnim proračunom efikasnosti paraboličnih žljebastih kolektora. U mnogim literaturama su istraživane i analizirane varijable koje utječu na efikasnost paraboličnih žljebastih solarnih kolektora i to numeričkim modelima kao i simulacijskim računalnim alatima.

Poprečni presjek solarnog termalnog paraboličnog žljebastog kolektora čini geometrijsku krivulju parabolu, te su sve Sunčeve zrake s kutem upada θ reflektirane od površine paraboličnog zrcala odnosno parabole, prema žarišnoj točki.



Slika 16. Geometrijski odnosi u paraboličnom žljebastom kolektoru [14].

Ako uzmemo u obzir matematičku funkciju parabole:

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad (10)$$

gdje f predstavlja duljinu žarišne linije, u tu jednadžbu mogu se ubaciti varijable sa Slike 16., tangens polovine obodnog kuta paraboličnog zrcala “ $d/2$ ”, te a širina aperture paraboličnog zrcala označena s “ a ”:

$$\tan\left(\frac{\psi}{2}\right) = \frac{a}{4f} \quad (11)$$

a – širina aperture paraboličnog zrcala,

ψ – obodni kut paraboličnog zrcala.

Geometrijski omjer koncentracije C_G onda je:

$$C_g = \frac{2a}{\pi d} \quad (12)$$

s obzirom da je polumjer apsorpcijske cijevi $d/2$ [m].

Općenito za solarne kolektore može se postaviti jednostavna energetska bilanca. Iskoristiva toplinska enegija q_{use} dobivena kolektorom [J/m^2] jednaka je:

$$q_{use} = \eta_{opt} \cdot G_c \cdot A_{ap,c} - U_c \cdot (T_c - T_{abs}) \cdot A_{ap,r} \quad (13)$$

η_{opt} - optička efikasnost kolektora,

G_c - tok solarnog zračenja na kolektoru [$W m^{-2}Hz^{-1}$],

$A_{ap,c}$ - površina aperture kolektora [m^2],

U_c - koeficijent prijenosa topline [W/m^2K],

T_c - temperatura kolektora [K],

T_{abs} - temperatura apsorpcijske cijevi [K],

$A_{ap,r}$ - površina apsorpcijske cijevi [m²].

Trenutna efikasnost kolektora η_c može se izraziti jednažbom kako slijedi:

$$\eta_c = \frac{q_{use}}{G_c \cdot A_{ap,c}} \quad (14)$$

Jednostavnim uvrštavanjem izraza (13) u izraz (14) dobivamo izraz:

$$\eta_c = \eta_{opt} - \frac{U_c \cdot (T_c - T_{abs})}{G_c} \cdot \frac{1}{C_G} \quad (15)$$

Drugi član jednažbe (15) odgovoran je za gubitak efikasnosti na paraboličnom žljebastom kolektoru.. Kod ravnih kolektora, C_G približno je jednak jedinici, dok za razliku od njih, parabolični kolektori imaju C_G veći od 1 ili mnogo veći od 1. Tu se može vidjeti veća efikasnost paraboličnih žljebastih kolektora u odnosu na ravne kolektore. Pri razmatranju varijabli paraboličnog žljebastog kolektora, bolje je imati što veći geometrijski omjer koncentracije C_G , jer je onda drugi član izraza (15) manji. Također, vidljivo je da je bolje imati što veći tok solarnog zračenja na kolektoru G_c .

Uzimajući u obzir osnove termodinamike, postoje ograničenja geometrijskog omjera koncentracije C_G koji se može dobiti na kolektorima. Maksimalni geometrijski omjer koncentracije $C_{G,max}$, ovisi o kutu upada i indeksu refrakcije.

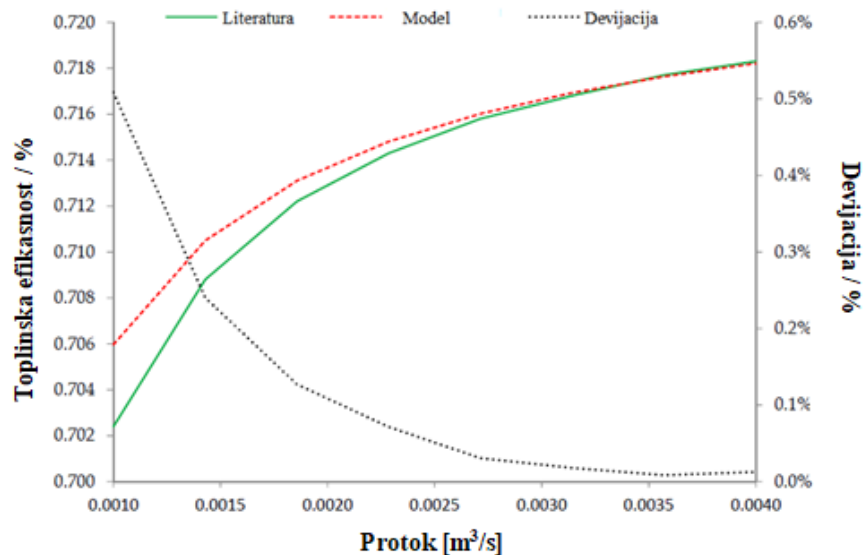
$$C_{G,max} = \frac{n}{\sin \theta} \quad (16)$$

n – indeks refrakcije na površini apsorpcijske cijevi,

θ – kut upada gledano s aperture kolektora.

Sustav u kojem se može postići ovakav omjer smatra se idealnim sustavom. Realni sustavi koji su danas u upotrebi uglavnom imaju manji omjer od idealnog omjera za faktor najmanje 2-4 [15].

Kod efikasnosti paraboličnih žljebastih kolektora važno je spomenuti brzinu protoka u apsorpcijskoj cijevi. Veći protoci doprinose većoj efikasnosti, zbog veće toplinske efikasnosti kolektora u intervalu od $0.0010 \text{ m}^3/\text{s}$ do $0.0025 \text{ m}^3/\text{s}$. Za vrijednosti protoka veće od $0.0025 \text{ m}^3/\text{s}$, ovaj se efekt smanjuje pa rast efikasnosti više nije toliko značajan, što je vidljivo na Slici 17. [16].



Slika 17. Ovisnost toplinske efikasnosti kolektora o protoku kroz apsorpcijsku cijev [16].

3.2. Optički gubitci

Kod solarnih termalnih paraboličnih žljebastih solarnih kolektora javlja se više vrsta optičkih gubitaka. Vrste optičkih gubitaka su sljedeće: (i) *gubitci usred geometrijskih nepravilnosti*, (ii) *gubitci usred ograničene reflektivnosti, apsorpcije i transmitacije*, (iii) *gubitci povezani s promjenjivim upadnim kutom direktnog Sunčevog zračenja θ* te (iv) *gubitci usred zasjenjenja rubova (edge shading correction)*.

Pojava **geometrijskih nepravilnosti** očituje se kad se uzme u obzir da su parabolična zrcala realni sustavi. Parabolična zrcala imaju određene geometrijske nepravilnosti i to rezultira

odstupanjem od idealnih sustava. Pogreške se mogu podijeliti na mikroskopske i makroskopske. Makroskopske pogreške odnose se na nagib i oblik paraboličnog zrcala. Mikroskopskim pogreškama pridonose sitne nepravilnosti u strukturi zrcala, koje onda uzrokuju veće širenje i rasipanje reflektiranog Sunčevog zračenja. Uzorak ove pojave je da u strukturi stakla prevladava amorfni silicijev dioksid SiO_2 , te atomi i molekule nisu organizirani u sasvim pravilnu prostornu rešetku, zbog čega refleksija zračenja nije uvijek pod točno određenim kutom [17]. Mogu se još u obzir uzeti pogreške pozicioniranja zrcala i apsorpcijske cijevi. Također do optičkih pogreška može doći uslijed lagane torzije paraboličnih zrcala koje mogu biti prisutne u realnim sustavima. Općenito, optičke se pogreške mogu opisati Gaussovom raspodjelom, pa ukupno rasipanje Sunčevih zraka σ_{tot} može biti izračunato kao srednji kvadrat korijena (RMS) vrijednosti svih optičkih pogrešaka. Matematički pojam RMS vrijednost definira se kao drugi korijen srednje vrijednosti kvadrata veličina uzetih u određenom intervalu [18].

Ukupno rasipanje Sunčevih zraka σ_{tot} može se iskazati kao:

$$\sigma_{tot} = (\sigma_{opt}^2 + \sigma_{sun}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

gdje σ_{opt} predstavlja optičku pogrešku dok σ_{sun} predstavlja pogrešku usred geometrijske nesavršenosti Sunca. Sunce nije točkasti izvor zračenja, ali se Sunčeva konačna veličina može opisati preko srednjeg kvadrata korijena (RMS) širinom od $\sigma_{sun} = 2.8$ mrad. Međutim prividna širina Sunca raste s upadnim kutom zračenja, te srednja vrijednost cjelodnevnog srednjeg kvadrata korijena iznosi 5 mrad za Sunce.

Optička pogreška σ_{opt} može se izračunati prema izrazu:

$$\sigma_{opt} = [4\sigma_{con}^2 + \sigma_{track}^2 + \lambda(\theta) \cdot (4\sigma_{con}^2 + \sigma_{spec}^2) + \sigma_{disp}^2 + \sigma_{spec}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

σ_{con} – RMS kutne devijacije paraboličnog zrcala od savršene parabole,

σ_{track} – RMS kutnog rasipanja usred pogreške orijentiranja prema Suncu,

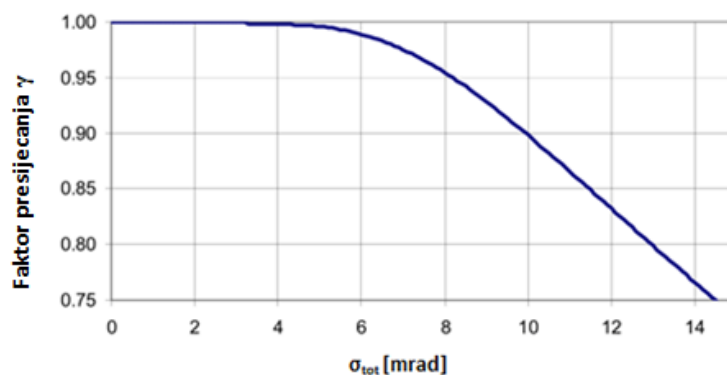
σ_{spec} – RMS kutnog rasipanja reflektiranog Sunčeva zračenja usred nesavršenog oblika zrcala,

σ_{disp} – RMS kutnog rasipanja usred nesavršenog pozicioniranja zrcala,

$\lambda(\theta)$ – koeficijent koji predstavlja doprinos zavisian o obodnom kutu longitudinalnih pogreški zrcala prema transversalnom širenju zračenja (vrijednost 0.1 za parabolične žljebaste kolektore s obodnom kutovima 80° do 100°).

Optičke pogreške dovode do smanjenja faktora presijecanja γ . Faktor presijecanja γ definira se kao omjer reflektiranog zračenja koje je pogodilo apsorpcijsku cijev i ukupnog reflektiranog zračenja [4]. Kod danas komercijalno poznatih solarnih termalnih paraboličnih žljebastih solarnih kolektora faktori presijecanja kreću se od 0,96 do 0,97.

Faktori presijecanja za linijske koncentratorske sustave kao što su solarni termalni parabolični žljebasti kolektori, mogu se dovesti u vezu s ukupnim rasipanje Sunčevih zraka σ_{tot} . Kao što se vidi na Slici 18., faktor presijecanja opada s porastom ukupnog rasipanja Sunčevih zraka σ_{tot} . Proračun i zavisnost dobiveni su na temelju proračuna za Eurotrough kolektore u radu “Trough Quality Control in large Production Series for Solar Fields” iz 2011. godine [19].

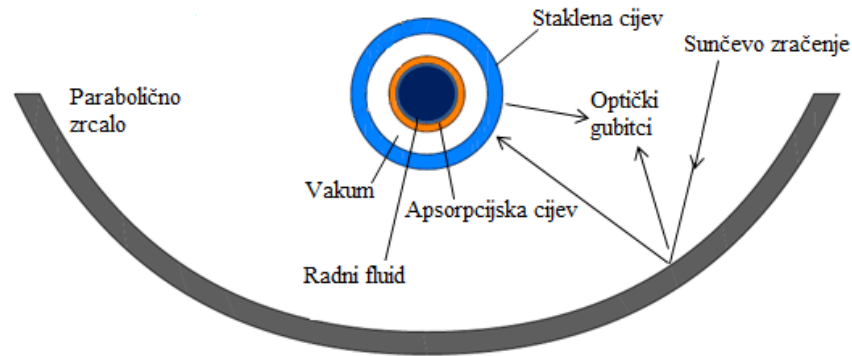


Slika 18. Ovisnost faktora presijecanja γ o totalnom rasipanju Sunčevih zraka σ_{tot} [19].

Gubici usred ograničene reflektivnosti, absorpcije i transmitacije optičkih komponenti solarnih termalnih paraboličnih žljebastih kolektora nastaju na staklenoj i apsorpcijskoj cijevi.

Staklena cijev propušta veći dio solarnog zračenja, dok samo manji dio (oko 4%) reflektira u okolinu zahvaljujući antirefleksivnim slojevima, kao što je vidljivo na Slici 19. Apsorpcijska cijev također ne iskoristi svo solarno zračenje koje na nju pada, nego se jedan manji dio (oko 5%) gubi. Ovako visoka apsorpcija se također postiže selektivnim premazima. Sljedeći

problem koji se javlja je prljavština i čestice koje se mogu naći na kolektorima, usred otvorenosti sustava na lokacijama gdje su postavljeni. Stoga je vrlo važno redovito čišćenje i održavanje kolektora kako bi se reducirali dodatni gubici.



Slika 19. Gubitci uslijed refleksije na staklenoj cijevi [20].

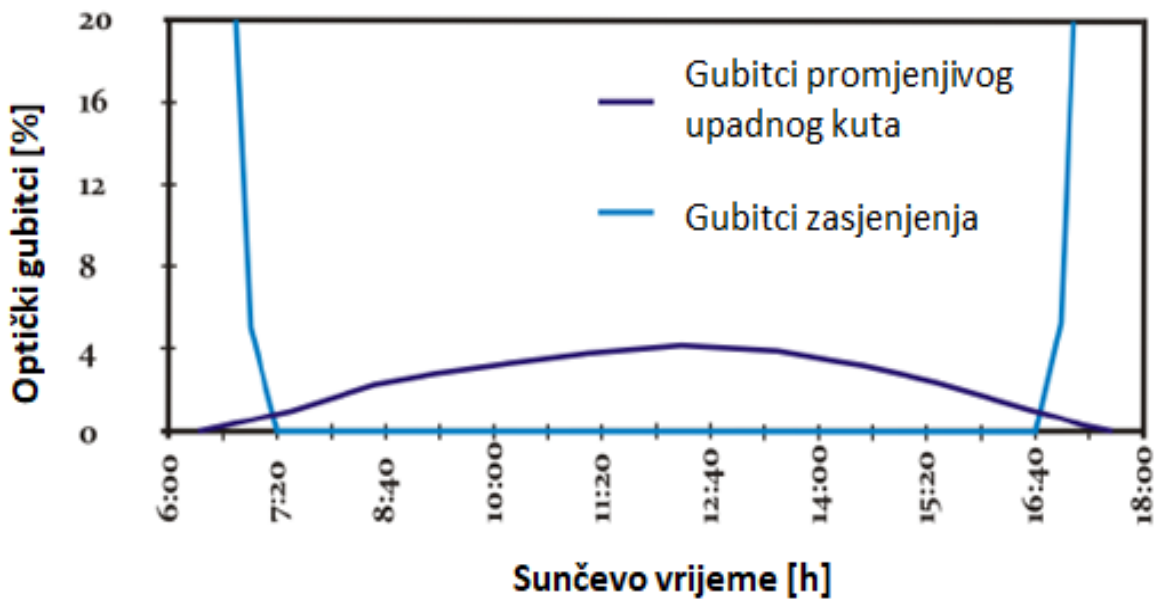
Obzirom da se parabolični žlijebovi sa zrcalima pomiču samo jednoosno, postoje **gubitci povezani s promjenjivim upadnim kutom direktnog Sunčevog zračenja**. Upadni kut se kontinuirano mijenja tijekom dana. S obzirom da su kolektori postavljeni u smjeru sjever-jug, upadni kut θ ovisi o solarnom zenitnom kutu θ_z , zatim o Sunčevom odklonu (deklinaciji) δ_s te satnom kutu ω prema izrazu:

$$\cos \theta = \sqrt{\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta_s \cdot \sin^2 \omega} \quad (19)$$

Povećanjem upadnog kuta θ , povećava dio reflektiran u okolinu na staklenoj cijevi i smanjuje se apsorpcija na apsorpcijskoj cijevi pa se gubi veći dio zračenja od uobičajenog. Također, povećanjem upadnog kuta, put koji svjetlosne zrake moraju proći od paraboličnog zrcala do apsorbera je duži. Duži put uzrokuje jače rasipanje i širenje svjetlosnih zraka, što zatim smanjuje faktor presijecanja, i u konačnici to rezultira padom efikasnosti sustava. Ako je veličina upadnog kuta θ do 20° stupnjeva, može se reći da je efikasnost kolektora visoka. Ako pak isti kut prelazi 70° , direktno Sunčevo zračenje koje pada na apsorpcijsku cijev nije dovoljno da se proizvede korisna energija i kolektor nije operativan [21].

Uz ranije navedeno, postoje još i gubici na krajevima paraboličnih žlijebova. Sveobuhvatno, ovi gubici su vidljivi na Slici 20. Najveći gubitak uslijed promjenjivog upadnog kuta uočava se oko podneva, kad je Sunce u zenitu te neposredno nakon toga (Slika 20.).

Kad je Sunce na niskim pozicijama, što je oko izlaska i zalaska Sunca, kolektori poredani u redove mogu zasjeniti jedni druge, što je jasno vidljivo na Slici 20. Tada govorimo o **gubiticima usred zasjenjenja rubova** (engl. "edge shading correction"). Kod manjih udaljenosti između redova solarnih termalnih paraboličnih žljebastih kolektora, imamo veće zasjenjenje. Veće pak udaljenosti povlače za sobom veće solarno polje i duže cijevi, skupa s većim materijalnim troškovima i višim toplinskim gubiticima. Optimalni razmak između redova kolektora je trostruka širine aperture kolektora a .

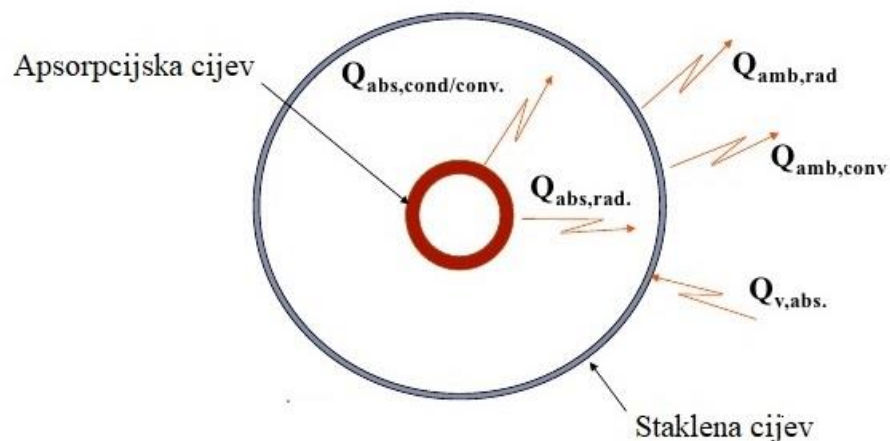


Slika 20. Gubici usred promjenjivog upadnog kuta i zasjenjenja rubova za vrijeme proljetnog i jesenskog ekvinocija na latitudi od 30° [4].

3.3. Toplinski gubitci

Kad se razmatraju toplinski gubitci kod solarnih termalnih paraboličnih žljebastih kolektora, oni se očituju na dva načina: (i) *redukcijom efikasnosti apsorpcijske cijevi* i (ii) *gubitcima na cjevovodima* kojima struji fluid za prijenos topline. Općenito, postoje tri mehanizma prijenosa topline: radijacija, konvekcija i kondukcija. Prijenos topline radijacijom odvija se zbog emisije elektromagnetskog zračenja. Zračenjem se prenosi energija s tvari koja zrači te se ovakav prijenos topline može odvijati čak i kroz vakuum. Konvekcija se pak očituje u konvekcijskim strujanjima i odnosi se na fluide. Kad se fluid zagrije, na molekularnoj razini u fluidu kinetička energija molekula se povećava, te fluid putuje i prenosi toplinsku energiju sa sobom. Ovdje valja naglasiti da zrak (fluid) struji oko staklene cijevi kolektora. Kod kondukcije prijenos topline se odvija direktnim sudarima molekula. Toplinska energija će preći s područja veće kinetičke energije na područje manje kinetičke energije [22].

Na slici 21. ilustrirani su energetske tokovi apsorpcijske cijevi koji se odnose na toplinske gubitke koji smanjuju korisnu energiju u odnosu na energiju koja bi se mogla dobiti solarnim zračenjem koje dolazi na apsorpcijsku cijev.



Slika 21. Energetske tokovi apsorpcijske cijevi [23].

Toplinski gubitci na apsorpcijskoj cijevi nastaju zbog **radijacije** i na slici 21. su označeni s $Q_{abs,rad}$, $Q_{amb,rad}$, zatim zbog **konvekcije** $Q_{abs,conv}$, $Q_{amb,conv}$ i **kondukcije** $Q_{abs,cond}$. Kondukcijski i konveksijski gubitci između vruće apsorpcijske cijevi i staklene cijevi omotača znatno se umanjuju vakuumom koji se nalazi između njih, dok su kondukcijski gubitci zanemarivi. Štoviše, provedena su ispitivanja koje je najbolje rješenje što se tiče dizajna prostora između apsorpcijske i staklene cijevi. Najmanja redukcija kondukcijskih i konveksijskih gubitaka dobivena je selektivnim premazom koji reducira gubitke, zatim tehnikom „*heat mirror coated glazing*“, nešto bolje od toga punjenjem međuprostora ksenonom i zatim najbolji rezultati vakumiranjem [24].

Toplinski gubitci najviše ovise o razlikama temperature između apsorpcijske cijevi i vanjskog zraka ΔT .

Konveksijski gubitak može se izračunati sljedećim izrazom:

$$Q_{abs,conv} = U_c \cdot A \cdot \Delta T \quad (20)$$

gdje je: U_c koeficijent prijenosa topline [W/m²K], A površina prijenosa topline [m²], te ΔT razlika u temperaturi između apsorpcijske i staklene cijevi, odnosno staklene cijevi i okoline. Koeficijent prijenosa topline U_c ovisi ponajviše o uvjetima vjetra i vlažnosti zraka. Koeficijent prijenosa topline kod proračuna konveksijskih gubitaka može se dovesti u vezu s bezdimenzijskim Nusseltovim brojem Nu , koji predstavlja omjer konvektivnog i konduktivnog prijenosa topline kod fluida, pod istim uvjetima kao i s Reynoldsovim brojem Re koji opisuje veličine koje utječu na strujanje fluida omjerom viskoznih i interakcijskih sila, ovisno o režimu strujanja fluida [21]. Ispitivanjem efikasnosti paraboličnih žljebastih kolektora u Slovačkom gradu Žilina, dobiveno je da se pri laganom vjetru lahoru (0.3 – 1.5 m/s) gubi efikasnost kolektora usred konvekcije zrakom, te gubitak iznosi do 19% [25].

Gubitci radijacijom mogu se izračunati ako uzmemo Stefan-Boltzmannovu konstantu σ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$], zatim temperaturu okoline T_{amb} , temperaturu apsorpcijske cijevi T_{abs} ili staklene cijevi T_{glass} , te težinske prosjeke apsorpcije i emisije za termalni radijacijski spektar pri temperaturi T , α_t i ε_t , prema izrazu:

$$Q_{abs,rad} = \alpha_{T,amb} \cdot \sigma \cdot A \cdot T_{amb}^4 - \varepsilon_{T,abs} \cdot \sigma \cdot A \cdot T_{abs}^4 \quad (21)$$

Iz jednadžbe (21) je vidljiv velik porast gubitaka radijacijom usred temperaturne razlike, što se može smanjiti selektivnim premazima. Cilj je da staklena cijev ima što manju transmitaciju jer to dovodi do izolacijskog efekta. Naime dio emitirane termalne radijacije s apsorpcijske cijevi zadržava se u sistemu, jer termalna radijacija dolazi do staklene cijevi te se generira dodatna povratna termalna radijacija na apsorpcijsku cijev, koja je zatim vrlo dobro apsorbirana zbog selektivnih premaza.

Kod cjevovoda kojima teče radni fluid, postoji termalna izolacija koja reducira temperaturu vanjske površine. Zbog toga se *prijenos topline kondukcijom* događa jedino između apsorpcijske cijevi i staklene cijevi. Izraz kojim možemo izračunati kondukcijske gubitke, a u kojem λ_{cond} predstavlja termalnu konduktivnost izolacijskog materijala [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$], A površinu prijenosa topline [m^2], dok b predstavlja debljinu izolacije [m]:

$$Q_{abs,cond} = \frac{\lambda_{cond}}{b} \cdot A \cdot \Delta T \quad (22)$$

Kod cjevovoda u elektranama, važno je imati što kraće cijevi kojima struji fluid, kako bi se dobili što manji toplinski gubitci. Ako su cijevi duže, raspodjela temperature može biti nejednaka i površina izmjene topline s okolinom je veća, što može smanjiti cjelokupnu efikasnost sustava. Zbog toga je važno blok napajanja elektrane uvijek postaviti unutar solarnog polja a ne izvan.

Efikasnost kolektora povezana s termičkim gubiticima istraživana je u *Sandia National Laboratories* u SAD-u, a kasnije su Gee i May došli do formule za efikasnost kolektora preko toplinskih gubitaka. Izraz sadrži i ranije navedeni parametar, razliku temperature apsorpcijske cijevi T_{abs} i temperature okoline T_{amb} :

Efikasnost kolektora η_c prema Gee i May jednaka je:

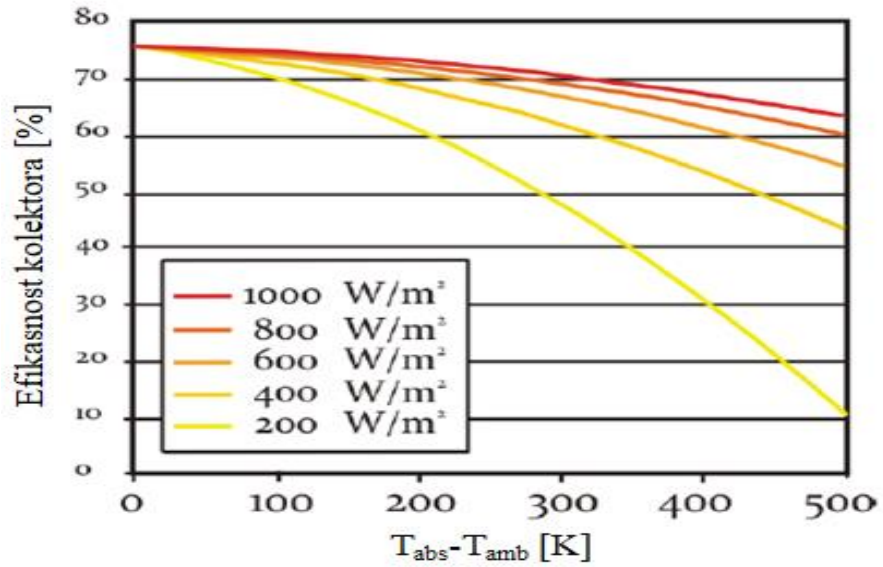
$$\eta_c = \eta_{opt} - \frac{U_C \cdot (T_{abs} - T_{amb})}{G_{b,ap}} \quad (23)$$

gdje je: η_{opt} produkt reflektivnosti kolektorske površine ρ , transmitacije staklene cijevi kolektora τ , i apsorbancije premaza na apsorpcijskoj cijevi α , dok $G_{b,ap}$ predstavlja ozračenje na aperturi [kWh/m^2] a U_C koeficijent gubitka topline s apsorpcijske cijevi. Koeficijent gubitka topline može se povezati empirijski s temperaturom apsorpcijske cijevi prema izrazu:

$$U_C = A + B \cdot (T_{abs} - T_{amb}) \quad (24)$$

gdje je T_{amb} okolišna temperatura, dok su A i B empirijski koeficijenti koji opisuju gubitak topline s absorbera, te se obično dobivaju iz testnih podataka. Prema Tzivanidis et al. u radu iz 2015., dobivene su vrijednosti koeficijenta prijenosa topline od $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ do $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Vrijednosti koeficijenata su relativno male, što se objašnjava dobrom izvedbom kolektora uz optimalne selektivne premaze i vakuumom između apsorpcijske i staklene cijevi.

Na slici 22. vidimo pad efikasnosti kolektora s povećanjem razlike u temperaturi između apsorpcijske cijevi i okolišne temperature. Također, efikasnost opada s manjim ozračenjem na aperturi a u skladu s izrazom (23).



Slika 22. Efikasnost Eurotrough kolektora u ovisnosti o razlici temperature apsorpcijske cijevi i okolišne temperature te direktnom ozračenju prema Geyer i suradnici 2002.

Jednadžba koja prikazuje ravnotežu topline cijele staklene cijevi ima oblik:

$$q_{use} = A_{rec,act} \cdot G_{rec} - Q_{glass,refl} - Q_{abs,refl} - Q_{glass,therm} - Q_{glass,conv} \quad (25)$$

q_{use} - iskoristiva toplina [J],

$A_{rec,act}$ - aktivna površina reflektora [m^2],

G_{rec} - solarno zračenje na apsorpcijsku cijev [$kWh\ m^{-1}$],

$Q_{glass,refl}$ - gubitci vezani za refleksiju na staklenoj cijevi [J],

$Q_{abs,refl}$ - gubitci vezani za refleksiju na apsorpcijskoj cijevi [J],

$Q_{glass,therm}$ - gubitci na staklenoj cijevi [J],

$Q_{glass,conv}$ - konveksijski gubitci na staklenoj cijevi [J].

U jednadžbi (25), nisu uzeti u obzir konvekcijski i radijacijski gubitci na apsorpcijskoj cijevi nego na staklenoj cijevi. Druga je mogućnost postaviti jednadžbu tako da se uzmu u obzir konvekcijski i radijacijski gubitci na apsorpcijskoj cijevi umjesto na staklenoj, te ona onda glasi:

$$q_{use} = A_{rec,act} \cdot G_{rec} - Q_{glass,refl} - Q_{glass,abs} - Q_{abs,refl} - Q_{abs,rad} - Q_{abs,conv} \quad (26)$$

$Q_{glass,abs}$ - toplina apsorbirana na staklenoj cijevi [J],

$Q_{abs,rad}$ - gubitci vezani za emisiju zračenja apsorpcijske cijevi [J],

$Q_{abs,conv}$ - konvekcijski gubitci na apsorpcijskoj cijevi [J].

Jednadžbe (25) i (26) će dati približno jednake vrijednosti, jer su gubitci topline apsorpcijske i staklene cijevi slični. Međutim, jednadžbe nisu jednake zbog dva efekta.

Prvo dio topline koji se gubi na staklenoj cijevi, koji osobito uključuje radijacijske gubitke, vraća se na apsorpcijsku cijev. Nadalje, radijacijski gubitci staklene cijevi, koja nije na visokim temperaturama, jesu prilično mali, pa je i povratni tok topline sa staklene na apsorpcijsku cijev vrlo mali. Taj povratni tok još je dodatno smanjen slabom apsorpcijom apsorpcijske cijevi u infracrvenom dijelu spektra. Drugi efekt očituje se u tome da dio emitirane radijacije s vruće apsorpcijske cijevi prolazi kroz staklenu cijev i ne apsorbira se, te se ne očituje kao gubitak topline. To se događa zbog slabe transmitacije staklene cijevi, izrađene većinom od borosilikatnog stakla. Transmitacija ipak postoji, te se dio termalne radijacije ne apsorbira na staklenoj cijevi, nego prolazi dalje u okolinu [4].

Može se zaključiti da na gubitke na apsorpcijskoj i staklenoj cijevi utječu različiti mehanizmi, s različitim postocima utjecaja. Na apsorpcijskoj cijevi radijacijski mehanizam gubitka topline je izraženiji, zbog visoke temperature i vakuuma koji ne dopušta velike konvekcijske i kondukcijske gubitke. Međutim, pošto u realnim sustavima nema savršenog vakuuma, u jednadžbi (22) prikazani su kondukcijski gubitci koji se ipak mogu javiti u malom postotku. Na staklenoj cijevi dominantan je konvekcijski mehanizam gubitka topline. Temperaturna razlika između staklene cijevi i okoline je prilično mala te nema velikih radijacijskih gubitaka već se okolni zrak slobodno giba oko staklene cijevi i događa se prijenos topline konvekcijom. Kvantifikaciju različitih mehanizama gubitka topline i njihov udio u

ukupnom gubitku sustava teško je odrediti i u obzir se moraju uzeti uvjeti poput temperaturnih razlika, apsolutnih temperatura, gibanja zračnih struja (vjetra) i vlažnosti okolišnog zraka.

3.4. Proračun proizvedene energije

Na osnovi postupka prikazanog u radu Glasnović i dr. (2011), [26], prikupljena solarna energija paraboličnih kolektora produkt je faktora djelotvornosti za odvođenje topline F (ovaj je broj jednak 1 ako se u proračun za količinu prikupljene Sunčeve energije uvrštava radna temperatura površine kolektorskih kanala od 360 °C), zatim dugoročnog prosjeka optičke djelotvornosti kolektora $\bar{\eta}_{opt}$, dugoročnog prosjeka faktora iskorištenja Sunčeve energije $\bar{\Phi}$ prema *Hottel-Whillierovom* konceptu i prosječne dnevne vrijednosti prikupljene solarne energije $E_{S(coll)}$ (J/m²/dan):

$$\bar{Q} = F \cdot \bar{\eta}_{opt} \cdot \bar{\Phi} \cdot E_{S(coll)} \quad (27)$$

Energija prikupljena kolektorom računa se kao razlika energije hemisfernog i difuznog zračenja, prema:

$$E_{S(coll)} = R_h E_{S(h)} - R_d E_{S(d)} = [R_h - R_d (E_{S(d)}/E_{S(h)})] \cdot E_{S(h)} = R_{coll} \cdot E_S \quad (28)$$

gdje su:

$E_{S(h)}$ - prosječno dnevno ozračivanje horizontalne površine hemisfernim zračenjem [Jm⁻²],

$E_{S(d)}$ - prosječno dnevno ozračivanje horizontalne površine difuznim zračenjem [Jm⁻²],

R_h - vremenski integral hemisfernog zračenja,

R_d - vremenski integral difuznog zračenja,

R_{coll} - omjer srednjeg dnevnog prikupljenog zračenja nagnute plohe „*tracking parabolic collectors*“ i horizontalne plohe.

Izrazi za parabolične kolektorske kanale, orijentirane u smjeru sjever-jug (Collares-Pereira and Rabl, 1979.) računaju se na sljedeći način:

$$\left. \begin{aligned}
 R_h &= \frac{1}{d \cos L} \int_0^{\omega_{\text{coll}}} (a + b \cos \omega) g(\omega) d\omega; \\
 R_d &= \frac{1}{d \cos L} \int_0^{\omega_{\text{coll}}} g(\omega) d\omega \text{ za jaku koncentraciju, } C_R > 10; \\
 g(\omega) &= \sqrt{\sin^2 \omega + [\cos(L - \beta) \cos \omega + \tan \delta_s \sin(L - \beta)]^2}; \\
 a &= 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - \pi/3); \\
 b &= 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - \pi/3); \\
 d &= \sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s.
 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

gdje je: ω_{coll} satni kut prikupljanja [rad]; ω_s satni kut zalaza [rad]; β nagib osi kanala u odnosu na horizontalu (za duge kolektorske kanale jednak je nuli), [rad]; L mjesna geografska širina (latituda) [rad]; δ_s Sunčev otklon (deklinacija); može se smatrati konstantnom za promatrani dan [rad]; C_R omjer koncentriranja, $g(\omega)$ je pomoćna funkcija te a , b i d su konstante u proračunu energije prikupljene kolektorom.

Veličina dugoročnog prosjeka faktora iskorištenja Sunčeve energije $\bar{\Phi}$, nelinearna je funkcija indeksa vedrine K_h i kritičnog omjera energija X . Izraz koji vrijedi za „*tracking parabolic collectors*“ prema Collares-Pereira and Rabl (1979) glasi:

$$\bar{\Phi} = 1 - (0,049 + 1,44K_h)X + 0,341K_hX^2 \quad (30)$$

Indeks vedrine K_h (*engl. clearness index*) je omjer globalnog Sunčevog zračenja koje pada na horizontalnu plohu na Zemlji i globalnog Sunčevog zračenja koje pada na horizontalnu plohu prije nego što uđe u Zemljinu atmosferu (*engl. extraterrestrial global irradiance*). Vrijednosti indeksa vedrine mogu se izraziti kao dnevni indeks vedrine $K_{h,d}$ ili satni indeks vedrine $K_{h,h}$. Tipične vrijednosti dnevnog indeksa vedrine kreću se od 0.68 - 0.72, u uvjetima bez naoblake, s nižim vrijednostima na visokim latitudama zimi [27].

Za nekoliko ljetnih dana u godini $K_h > 0,75$, vrijedi:

$$\bar{\Phi} = 1 - X \quad (31)$$

Kritični omjer energija računa se prema:

$$X = \frac{\bar{q}_u}{\bar{\eta}_0 E_{S(coll)}} \quad (31)$$

gdje je \bar{q}_u gubitak topline s površine kolektorske cijevi ($J/m^2/dan$), $\bar{\eta}_{opt}$ dugoročni prosjek optičke djelotvornosti kolektora i $E_{S(coll)}$ prosječna dnevna vrijednost prikupljene Sunčeve energije ($J/m^2/dan$). To je u stvari omjer gubitka s površine kolektorske cijevi i prikupljene Sunčeve energije u kolektorskoj cijevi.

Gubitak s površine kolektorske cijevi, izražen također po jedinici površine njegove aperture jest:

$$\bar{q}_u = 2t_c U_c (T_{coll} - T_{amb}) \quad (32)$$

t_c je poluvrijeme prikupljanja, a U_c je koeficijent prijenosa topline (W/m^2K); T_{coll} je temperatura površine kolektorskih kanala, T_{amb} je okolišna temperatura.

Koeficijent prijenosa topline može se prema Hove (2000) izraziti aproksimativnom formulom:

$$U_c = a(T_{coll} - T_{amb})^b \quad (33)$$

gdje su a i b koeficijenti karakteristični za određeni tip solarnih paraboličnih kolektora.

Uvrštenjem jednadžbe (33) u jed. (32) dobiva se:

$$\bar{q}_u = 2t_c a (T_{\text{coll}} - T_{\text{amb}})^b \quad (34)$$

Ukoliko se želi izračunati i električna energija $E_{\text{el(ST)}}$ koju bi solarna elektrana s paraboličnim žljebastim kolektorima mogla proizvesti iz toplinske energije \bar{Q} (J/m^2), uz efikasnost pretvorbe toplinske u električnu energiju $\bar{\eta}_{Q-EL} = 0.35$ (Goswami, et.al., 2000) i površine aperture kolektora $A_{\text{ap, c}}$, može se koristiti izraz:

$$E_{\text{el(ST)}} = \bar{\eta}_{Q-EL} \cdot f_m \cdot A_{\text{ap, c}} \cdot \bar{Q} \quad (35)$$

gdje je f_m koeficijent neprilagođenja tereta karakteristikama generatora ST elektrane.

Uvrštavanjem jednadžbe (27) u jed. (35), dobiva se prosječna dnevna vrijednost proizvedene električne energije iz ST elektrane (J/dan):

$$E_{\text{el(ST)}} = \eta_{Q-EL} \cdot f_m \cdot A_{\text{ap, c}} \cdot F \cdot \bar{\eta}_{\text{opt}} \cdot \bar{\Phi} \cdot E_{S(\text{coll})} \quad (36)$$

koja za jediničnu vrijednost površine aperture kolektora ima oblik:

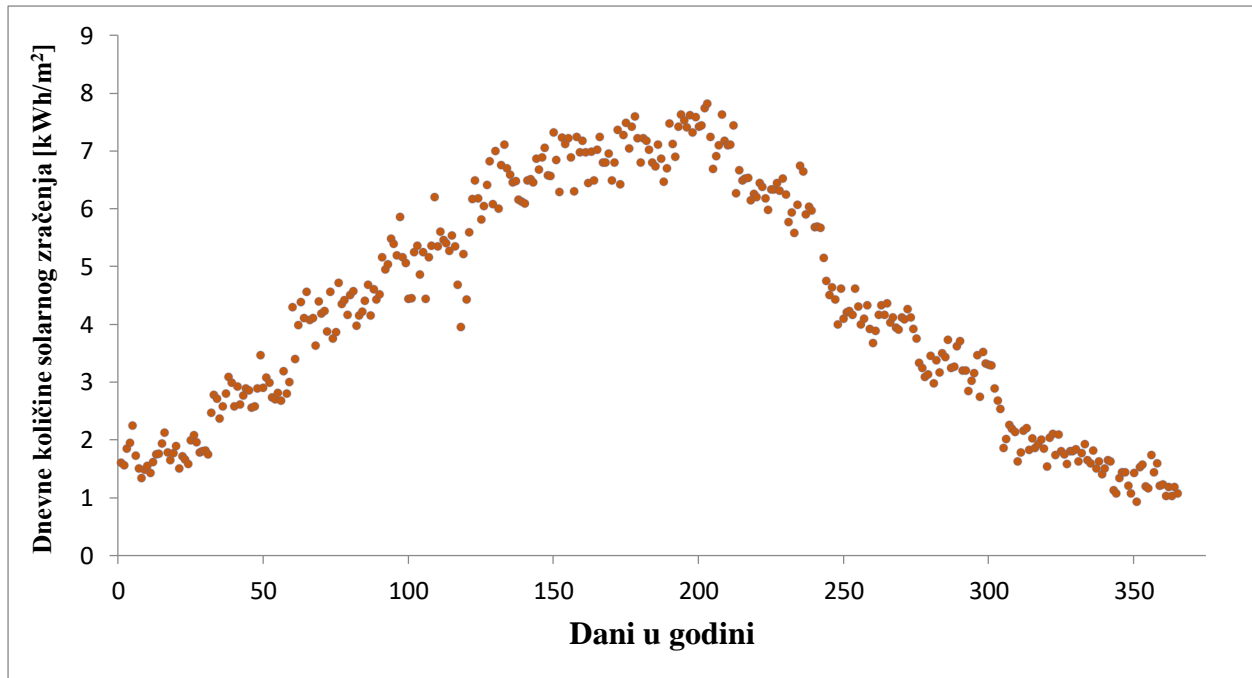
$$E_{\text{el(ST)}} = \eta_{Q-EL} \cdot f_m \cdot F \cdot \bar{\eta}_{\text{opt}} \cdot \bar{\Phi} \cdot E_{S(\text{coll})} \quad (37)$$

4. REZULTATI

Za studiju slučaja primjene paraboličnih žljebastih kolektora i proračuna proizvedene količine topline, uzeta je lokacija otoka Visa, za koju su u Tablici 2. dane vrijednosti energije solarnog zračenja, izražene u kWh/m²/dan (podaci su dani za otok Palagružu jer za nju postoje mjereni podaci za period 1995.-2006. godine).

Tablica 2. Srednje dnevno globalno zračenje, (kWh/m²), otok Palagruža periodu 1995-2006. godine.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	1.61	2.48	4.30	5.17	5.60	6.29	7.18	6.27	4.76	3.92	1.87	1.60
2	1.57	2.78	3.41	4.96	6.17	7.24	7.03	6.67	4.51	3.76	2.02	1.82
3	1.85	2.72	3.99	5.04	6.50	7.13	6.80	6.49	4.64	3.34	2.26	1.51
4	1.95	2.37	4.39	5.49	6.18	7.23	6.74	6.53	4.43	3.25	2.20	1.63
5	2.25	2.59	4.11	5.40	5.82	6.89	7.11	6.54	4.00	3.10	2.14	1.41
6	1.73	2.81	4.57	5.20	6.05	6.31	6.87	6.15	4.62	3.14	1.63	1.51
7	1.51	3.10	4.08	5.86	6.42	7.25	6.47	6.26	4.10	3.46	1.79	1.65
8	1.35	2.99	4.11	5.17	6.83	6.98	6.71	6.21	4.21	2.98	2.17	1.63
9	1.49	2.58	3.64	5.07	6.08	7.18	7.48	6.45	4.24	3.38	2.21	1.13
10	1.55	2.93	4.40	4.45	7.00	6.98	7.13	6.38	4.17	3.17	1.83	1.08
11	1.43	2.62	4.19	4.46	6.01	6.45	6.90	6.18	4.62	3.51	2.03	1.34
12	1.62	2.77	4.24	5.25	6.76	6.99	7.43	5.98	4.31	3.44	1.87	1.45
13	1.75	2.90	3.88	5.36	7.11	6.49	7.63	6.34	4.00	3.74	1.93	1.45
14	1.77	2.86	4.57	4.87	6.70	7.03	7.54	6.34	4.10	3.25	2.01	1.21
15	1.94	2.56	3.76	5.25	6.59	7.25	7.41	6.45	4.33	3.27	1.85	1.08
16	2.13	2.58	3.87	4.45	6.46	6.81	7.62	6.32	3.92	3.63	1.54	1.43
17	1.79	2.89	4.72	5.17	6.48	6.81	7.33	6.53	3.68	3.71	2.04	0.93
18	1.65	3.47	4.36	5.36	6.16	6.96	7.59	6.25	3.89	3.21	2.11	1.53
19	1.78	2.91	4.42	6.21	6.13	6.49	7.43	5.77	4.17	3.21	1.74	1.58
20	1.90	3.08	4.17	5.35	6.10	6.80	7.45	5.94	4.33	2.85	2.10	1.20
21	1.51	3.00	4.51	5.61	6.50	7.37	7.75	5.59	4.17	3.03	1.81	1.17
22	1.72	2.74	4.58	5.47	6.52	6.43	7.82	6.07	4.37	3.16	1.76	1.74
23	1.67	2.71	3.98	5.41	6.46	7.28	7.25	6.75	4.04	3.47	1.59	1.44
24	1.59	2.82	4.16	5.28	6.87	7.49	6.69	6.65	4.13	2.75	1.81	1.60
25	2.00	2.68	4.22	5.54	6.68	7.05	6.91	5.91	3.95	3.53	1.81	1.21
26	2.09	3.19	4.41	5.35	6.89	7.42	7.10	6.04	3.91	3.33	1.84	1.23
27	1.96	2.81	4.69	4.69	7.06	7.60	7.63	5.97	4.13	3.31	1.63	1.04
28	1.79	3.01	4.16	3.96	6.58	7.23	7.18	5.69	4.09	3.29	1.78	1.19
29	1.81		4.61	5.22	6.57	6.81	7.10	5.70	4.27	2.89	1.93	1.03
30	1.82		4.43	4.44	7.32	7.22	7.12	5.68	4.13	2.69	1.65	1.19
31	1.75		4.52		6.85		7.45	5.15		2.54		1.08
Prosjek	1.68	2.83	4.41	4.81	6.22	6.75	7.31	5.71	4.44	3.23	1.76	1.34



Slika 23. Dnevne količine solarnog zračenja (kWh/m^2), Palagruža u periodu 1995-2006. godine.

Ukupno godišnje zračenje na spomenutoj lokaciji iznosi 1545 kWh/m^2 godišnje, dok su u posljednjem retku tablice dani i mjesečni prosjeci, od kojih je najveći u srpnju (7.31 kWh/m^2). Odmah se uočava i da je energija solarnog zračenja za studeni, prosinac i siječanj ispod 2 kWh/m^2 , a što znači i da dozračena Sunčeva energija od 1 kW u tim mjesecima traje kraće od 2 h , a što je odmah vidljivo da neće biti dostatno za pokretanje i rad solarnih paraboličnih kolektora.

Naime, prema Montes et al. (2009), solarni parabolični žljebasti kolektori mogu proizvoditi toplinsku energiju samo ako je intenzitet solarnog zračenja iznad 300 W/m^2 , a koji veličinom, prema Glasnović et. al. (2011), [26] korespondira s minimalnom dnevnom količinom solarnog zračenja od oko 2 kWh/m^2 dan.

Dakle, solarni parabolični kolektori, na predmetnoj lokaciji, neće moći tijekom cijele godine proizvoditi električnu energiju, nego samo devet mjeseci jer u spomenuta tri mjeseca nema dovoljno solarnog zračenja.

U proračunu prikupljene energije, odabrana je radna temperatura površine kolektorske cijevi od $T_{\text{coll}}=360 \text{ }^\circ\text{C}$; faktor djelotvornosti za odvođenje topline $F=1$ (Hove, 2000), optička

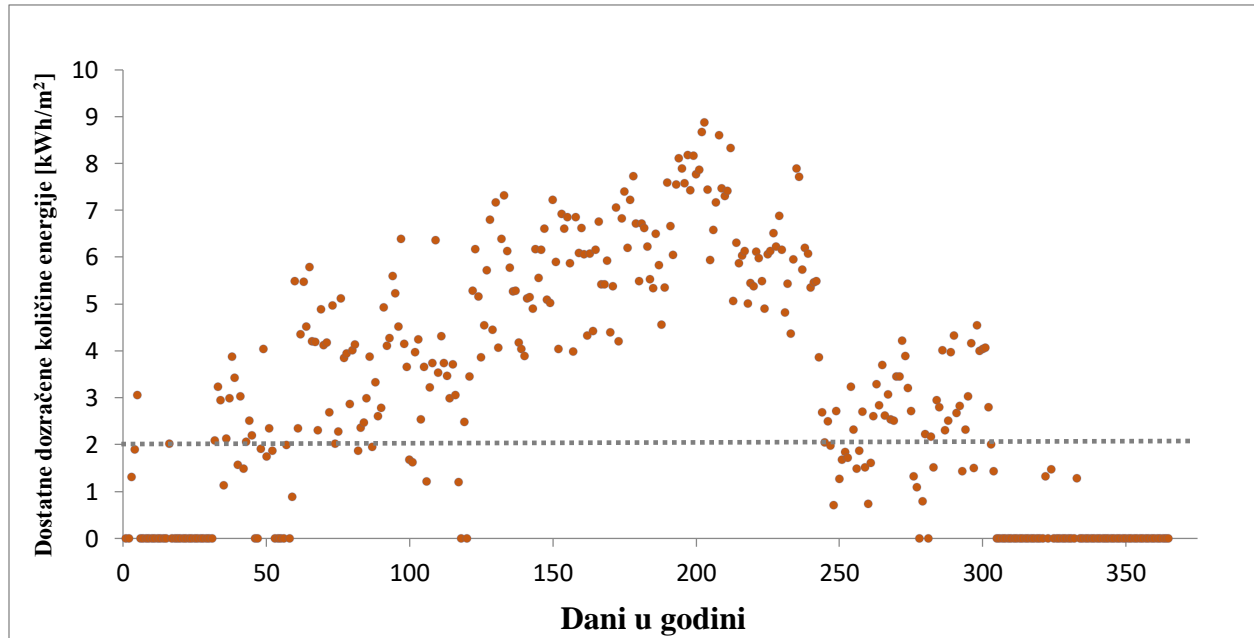
djelotvornost kolektora $\bar{\eta}_{opt}=0,65$ (Hove, 2000), iako danas postoje i djelotvorniji kolektori (u radu Zarza et.al, 2006 računato je s vrijednošću od $\bar{\eta}_{opt}=0.74$), te karakteristični parametri toplinskih gubitaka $a=0,09$ i $b=0,24$ (Hove, 2000). Zanimarena su zasjenjenja rubova (*edge shading correction*) i bočne korekcije (*lateral correction*) (Mittelman and Epstein, 2010), djelatne na početku, odnosno kraju dnevnog ciklusa prikupljanja Sunčeve energije.

Slijedom navedenog, u Tablici 3. su dane vrijednosti dozračene solarne energije, a koje su dostatne za proizvodnju toplinske energije na izlazu, te su prikazane i na Slici 24. Siva linija okomita na ordinatu predstavlja granicu od 2 kWh m^{-2} . Točke koje se nalaze ispod granice, predstavljaju dane u godini, kada je dozračena količina energije manja od 2 kWh m^{-2} , te upravo ti dani u godini pridonose neupotrebljivosti kolektora u mjesecima studenom, prosincu i siječnju.

Tablica 3. Dnevne količine solarnog zračenja (kWh/m²) koje su dostatne za proizvodnju toplinske energije od strane paraboličnih žljebastih kolektora.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	0.00	2.10	5.50	4.94	3.46	4.04	6.63	5.07	2.69	3.21	0.00	0.00
2	0.00	3.24	2.35	4.12	5.29	6.93	6.23	6.32	2.05	2.72	0.00	0.00
3	1.32	2.95	4.36	4.28	6.18	6.61	5.53	5.87	2.50	1.33	0.00	0.00
4	1.90	1.14	5.48	5.60	5.16	6.86	5.35	6.04	1.98	1.09	0.00	0.00
5	3.06	2.14	4.53	5.24	3.87	5.88	6.50	6.13	0.72	0.00	0.00	0.00
6	0.00	3.00	5.79	4.52	4.55	3.99	5.84	5.02	2.72	0.80	0.00	0.00
7	0.00	3.88	4.21	6.39	5.72	6.86	4.56	5.46	1.27	2.23	0.00	0.00
8	0.00	3.43	4.20	4.15	6.81	6.10	5.36	5.38	1.68	0.00	0.00	0.00
9	0.00	1.58	2.31	3.67	4.45	6.63	7.60	6.12	1.85	2.18	0.00	0.00
10	0.00	3.04	4.89	1.68	7.17	6.07	6.67	5.98	1.73	1.52	0.00	0.00
11	0.00	1.49	4.13	1.63	4.08	4.33	6.06	5.49	3.24	2.96	0.00	0.00
12	0.00	2.06	4.18	3.98	6.40	6.08	7.55	4.91	2.33	2.81	0.00	0.00
13	0.00	2.52	2.70	4.25	7.32	4.43	8.11	6.07	1.49	4.02	0.00	0.00
14	0.00	2.20	4.98	2.55	6.13	6.17	7.90	6.14	1.88	2.31	0.00	0.00
15	0.00	0.00	2.02	3.67	5.78	6.76	7.58	6.52	2.71	2.52	0.00	0.00
16	2.02	0.00	2.29	1.22	5.28	5.43	8.18	6.23	1.52	3.98	0.00	0.00
17	0.00	1.92	5.12	3.23	5.29	5.42	7.43	6.89	0.74	4.34	0.00	0.00
18	0.00	4.05	3.86	3.75	4.18	5.93	8.17	6.17	1.61	2.68	1.33	0.00
19	0.00	1.75	3.95	6.37	4.04	4.40	7.78	4.83	2.61	2.83	0.00	0.00
20	0.00	2.35	2.87	3.54	3.89	5.38	7.87	5.44	3.30	1.44	1.48	0.00
21	0.00	1.87	4.02	4.32	5.13	7.07	8.68	4.38	2.84	2.32	0.00	0.00
22	0.00	0.00	4.14	3.75	5.15	4.21	8.88	5.96	3.71	3.03	0.00	0.00
23	0.00	0.00	1.88	3.47	4.91	6.83	7.45	7.90	2.62	4.17	0.00	0.00
24	0.00	0.00	2.36	3.00	6.18	7.41	5.94	7.72	3.07	1.51	0.00	0.00
25	0.00	0.00	2.47	3.72	5.56	6.21	6.59	5.74	2.54	4.55	0.00	0.00
26	0.00	2.00	2.99	3.06	6.17	7.23	7.17	6.20	2.52	4.01	0.00	0.00
27	0.00	0.00	3.88	1.20	6.61	7.73	8.61	6.08	3.46	4.04	0.00	0.00
28	0.00	0.89	1.95	0.00	5.10	6.73	7.48	5.36	3.46	4.07	0.00	0.00
29	0.00		3.34	2.49	5.03	5.49	7.31	5.47	4.22	2.80	1.29	0.00
30	0.00		2.61	0.00	7.23	6.72	7.42	5.50	3.89	2.01	0.00	0.00
31	0.00		2.79		5.90		8.34	3.87		1.44		0.00

Dakle, tijekom studenog, prosinca i siječnja, količine dozračene solarne energije na predmetnoj lokaciji nisu dostatne da bi solarni parabolični kolektori mogli proizvoditi toplinsku energiju koja bi bila dovoljna za pogon turbina solarne termalne elektrane.



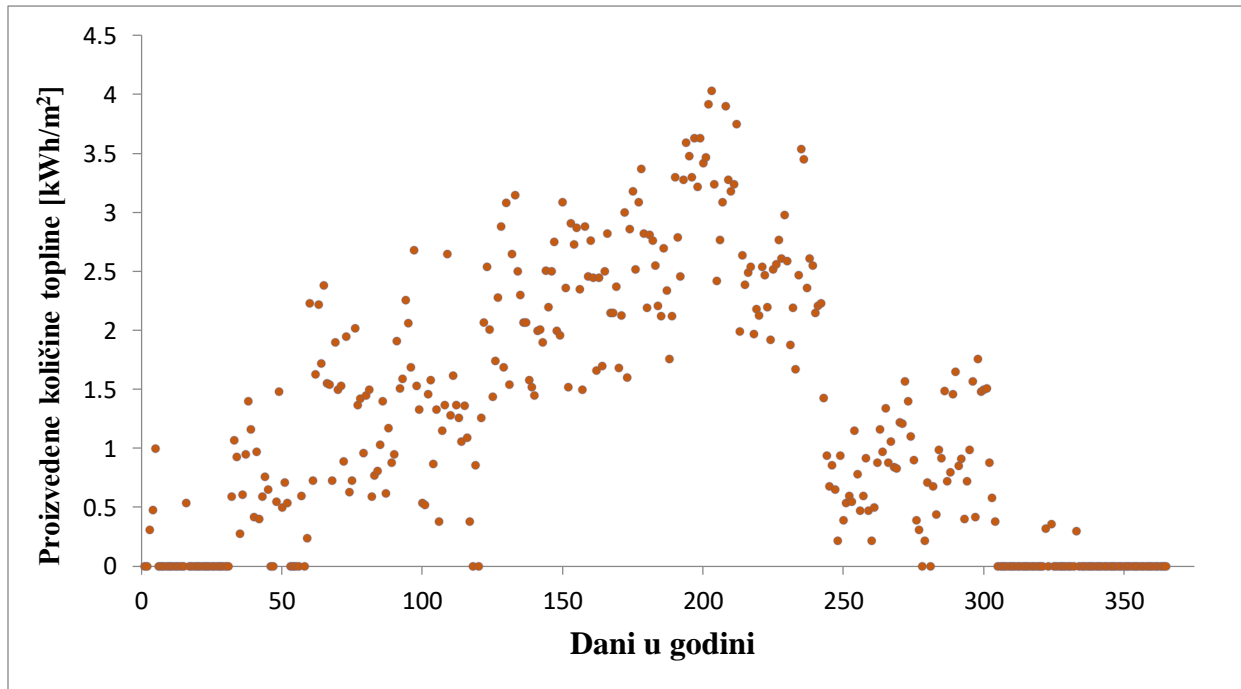
Slika 24. Dnevne količine solarnog zračenja i dostatne količine energije da bi solarni parabolični kolektori mogli proizvoditi toplinsku energiju.

U tablici 4. i slici 25., prikazane su jedinične vrijednosti proizvedene količine topline iz paraboličnih žljebastih kolektora, proračunate po formuli (27) ovog rada. Jedinične vrijednosti se odnose na m² aperture kolektora.

Ukupna vrijednost proizvedene količine topline tijekom godine iznosi **459.57 kWh/m²**.

Tablica 4. Proizvedene količine topline iz paraboličnih žljebastih kolektora (kWh/m²).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	0.00	0.59	2.23	1.91	1.26	1.52	2.76	1.99	0.94	1.10	0.00	0.00
2	0.00	1.07	0.73	1.51	2.07	2.91	2.55	2.64	0.68	0.90	0.00	0.00
3	0.31	0.93	1.63	1.59	2.54	2.73	2.21	2.39	0.86	0.39	0.00	0.00
4	0.48	0.28	2.22	2.26	2.01	2.87	2.12	2.49	0.65	0.31	0.00	0.00
5	1.00	0.61	1.72	2.06	1.44	2.35	2.70	2.54	0.22	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.95	2.38	1.69	1.74	1.50	2.34	1.97	0.94	0.22	0.00	0.00
7	0.00	1.40	1.55	2.68	2.28	2.88	1.76	2.18	0.39	0.71	0.00	0.00
8	0.00	1.16	1.54	1.53	2.88	2.46	2.12	2.13	0.54	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.42	0.73	1.33	1.69	2.76	3.30	2.54	0.60	0.68	0.00	0.00
10	0.00	0.97	1.90	0.54	3.08	2.45	2.79	2.47	0.55	0.44	0.00	0.00
11	0.00	0.40	1.50	0.52	1.54	1.66	2.46	2.20	1.15	0.99	0.00	0.00
12	0.00	0.59	1.53	1.46	2.65	2.45	3.28	1.92	0.78	0.92	0.00	0.00
13	0.00	0.76	0.89	1.58	3.15	1.70	3.59	2.52	0.47	1.49	0.00	0.00
14	0.00	0.65	1.95	0.87	2.50	2.50	3.48	2.56	0.60	0.72	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.63	1.33	2.30	2.82	3.30	2.77	0.92	0.80	0.00	0.00
16	0.54	0.00	0.73	0.38	2.07	2.15	3.63	2.61	0.47	1.46	0.00	0.00
17	0.00	0.55	2.02	1.15	2.07	2.15	3.22	2.98	0.22	1.65	0.00	0.00
18	0.00	1.48	1.37	1.37	1.58	2.37	3.63	2.59	0.50	0.85	0.32	0.00
19	0.00	0.50	1.42	2.65	1.52	1.68	3.42	1.88	0.88	0.91	0.00	0.00
20	0.00	0.71	0.96	1.28	1.45	2.13	3.47	2.19	1.16	0.40	0.36	0.00
21	0.00	0.54	1.45	1.62	2.00	3.00	3.92	1.67	0.97	0.72	0.00	0.00
22	0.00	0.00	1.50	1.37	2.01	1.60	4.03	2.47	1.34	0.99	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.59	1.26	1.90	2.86	3.24	3.54	0.88	1.57	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.77	1.06	2.51	3.18	2.42	3.45	1.06	0.42	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.81	1.36	2.20	2.52	2.77	2.36	0.84	1.76	0.00	0.00
26	0.00	0.60	1.03	1.09	2.50	3.09	3.09	2.61	0.83	1.48	0.00	0.00
27	0.00	0.00	1.40	0.38	2.75	3.37	3.90	2.55	1.22	1.50	0.00	0.00
28	0.00	0.24	0.62	0.00	2.00	2.82	3.28	2.15	1.21	1.51	0.00	0.00
29	0.00		1.17	0.86	1.96	2.19	3.18	2.21	1.57	0.88	0.30	0.00
30	0.00		0.88	0.00	3.09	2.81	3.24	2.23	1.40	0.58	0.00	0.00
31	0.00		0.95		2.36		3.75	1.43		0.38		0.00



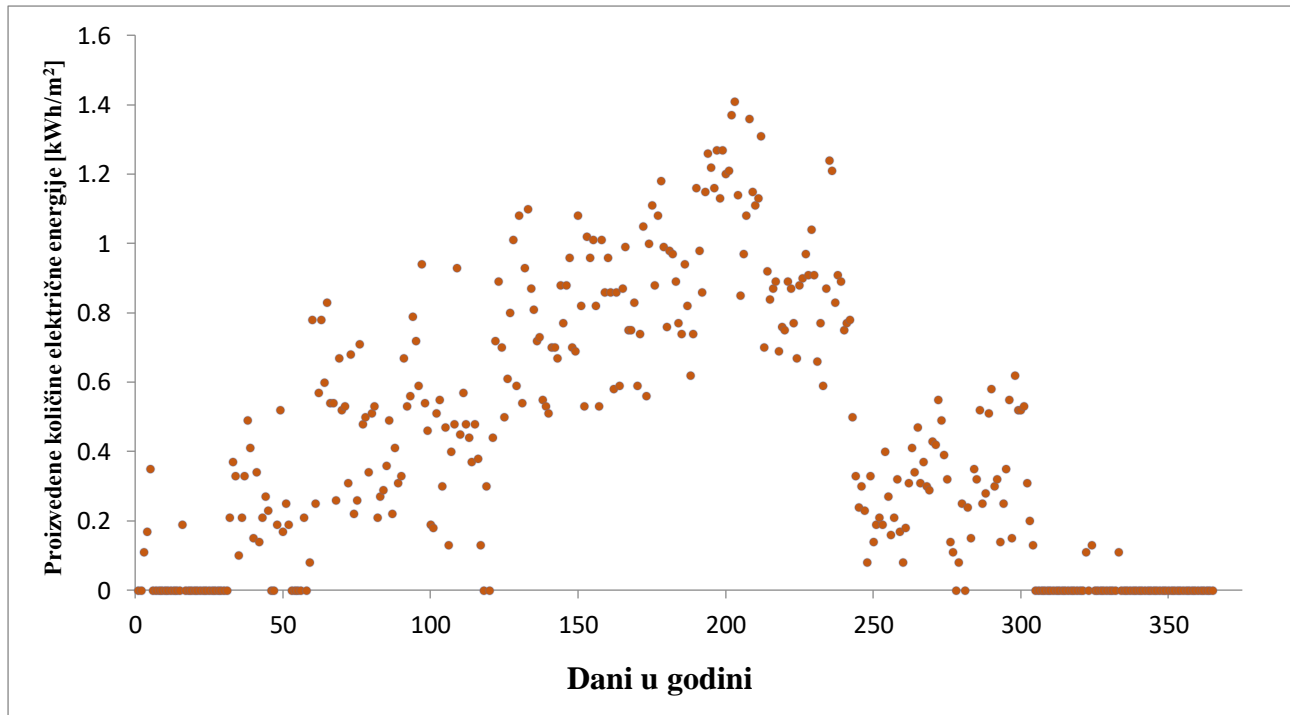
Slika 25. Proizvedena količina topline iz paraboličnih žljebastih kolektora.

U tablici 5. i na slici 26, prikazane su jedinične vrijednosti električne energije koja bi se mogla proizvesti pomoću paraboličnih žljebastih kolektora (uz efikasnost pretvorbe toplinske u električnu energiju $\bar{\eta}_{Q-EL}=0.35$), a koja je energija proračunata po formuli (37) ovog rada.

Ukupna vrijednost proizvedene električne energije tijekom godine iznosi **160.85 kWh/m²**.

Tablica 5. Proizvedene količine električne energije iz paraboličnih žljebastih kolektora (kWh/m²).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	0.00	0.21	0.78	0.67	0.44	0.53	0.97	0.70	0.33	0.39	0.00	0.00
2	0.00	0.37	0.25	0.53	0.72	1.02	0.89	0.92	0.24	0.32	0.00	0.00
3	0.11	0.33	0.57	0.56	0.89	0.96	0.77	0.84	0.30	0.14	0.00	0.00
4	0.17	0.10	0.78	0.79	0.70	1.01	0.74	0.87	0.23	0.11	0.00	0.00
5	0.35	0.21	0.60	0.72	0.50	0.82	0.94	0.89	0.08	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.33	0.83	0.59	0.61	0.53	0.82	0.69	0.33	0.08	0.00	0.00
7	0.00	0.49	0.54	0.94	0.80	1.01	0.62	0.76	0.14	0.25	0.00	0.00
8	0.00	0.41	0.54	0.54	1.01	0.86	0.74	0.75	0.19	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.15	0.26	0.46	0.59	0.96	1.16	0.89	0.21	0.24	0.00	0.00
10	0.00	0.34	0.67	0.19	1.08	0.86	0.98	0.87	0.19	0.15	0.00	0.00
11	0.00	0.14	0.52	0.18	0.54	0.58	0.86	0.77	0.40	0.35	0.00	0.00
12	0.00	0.21	0.53	0.51	0.93	0.86	1.15	0.67	0.27	0.32	0.00	0.00
13	0.00	0.27	0.31	0.55	1.10	0.59	1.26	0.88	0.16	0.52	0.00	0.00
14	0.00	0.23	0.68	0.30	0.87	0.87	1.22	0.90	0.21	0.25	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.22	0.47	0.81	0.99	1.16	0.97	0.32	0.28	0.00	0.00
16	0.19	0.00	0.26	0.13	0.72	0.75	1.27	0.91	0.17	0.51	0.00	0.00
17	0.00	0.19	0.71	0.40	0.73	0.75	1.13	1.04	0.08	0.58	0.00	0.00
18	0.00	0.52	0.48	0.48	0.55	0.83	1.27	0.91	0.18	0.30	0.11	0.00
19	0.00	0.17	0.50	0.93	0.53	0.59	1.20	0.66	0.31	0.32	0.00	0.00
20	0.00	0.25	0.34	0.45	0.51	0.74	1.21	0.77	0.41	0.14	0.13	0.00
21	0.00	0.19	0.51	0.57	0.70	1.05	1.37	0.59	0.34	0.25	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.53	0.48	0.70	0.56	1.41	0.87	0.47	0.35	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.21	0.44	0.67	1.00	1.14	1.24	0.31	0.55	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.27	0.37	0.88	1.11	0.85	1.21	0.37	0.15	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.29	0.48	0.77	0.88	0.97	0.83	0.30	0.62	0.00	0.00
26	0.00	0.21	0.36	0.38	0.88	1.08	1.08	0.91	0.29	0.52	0.00	0.00
27	0.00	0.00	0.49	0.13	0.96	1.18	1.36	0.89	0.43	0.52	0.00	0.00
28	0.00	0.08	0.22	0.00	0.70	0.99	1.15	0.75	0.42	0.53	0.00	0.00
29	0.00		0.41	0.30	0.69	0.76	1.11	0.77	0.55	0.31	0.11	0.00
30	0.00		0.31	0.00	1.08	0.98	1.13	0.78	0.49	0.20	0.00	0.00
31	0.00		0.33		0.82		1.31	0.50		0.13		0.00



Slika 26. Električna energija koja se može proizvesti paraboličnim žljebastim kolektorima.

5. RASPRAVA I ZAKLJUČCI

Radom je prikazan proračun solarnog paraboličnog žljebastog kolektora koji je danas najviše u upotrebi kod solarnih termalnih koncentratorskih sustava (čak 90% instaliranih kapaciteta), a koji se koriste kod solarnih termalnih elektrana za proizvodnju električne i toplinske energije.

Prednosti, a time i razlozi za tako veliko korištenje paraboličnih žljebastih kolektora, su u prvom redu u njihovoj najnižoj cijeni u usporedbi s drugim koncentratorskim sustavima, ali također i u mogućnošću postizanja relativno visokih temperatura, a time i relativno visokih efikasnosti. Te efikasnosti pretvorbe iz solarne u toplinsku energiju iznose od 60-80% (što ovisi o omjeru koncentracije, odnosno postignutoj temperaturi), dok ta učinkovitost pretvorbe u električnu energiju kod solarnih termalnih elektrana iznosi oko 14-16%.

Parabolični žljebasti kolektori koriste samo direktnu komponentu solarnog zračenja, koja je, osim u području oko ekvatora, veća od globalnog zračenja, a što znači da ovi kolektori prate Sunce (od istoka prema zapadu – sami kolektori su postavljeni u smjeru sjever-jug), a što predstavlja i njihov najveći nedostatak. Uz to, problem je da postoji donji prag korištenja ovih kolektora kod solarnih termalnih elektrana, a koji se procjenjuje u vrijednosti od 300 W/m^2 . Ta činjenica ograničava njihovo korištenje u područjima koja u zimskim mjesecima imaju dnevne vrijednosti solarnog zračenja ispod 2 kWh/m^2 .

Proračuni polaze od termičkih gubitaka reflektora i apsorpcijske cijevi.

Prikupljena solarna energija paraboličnih kolektora produkt je faktora djelotvornosti za odvođenje topline F (ovaj je broj jednak 1 ako se u proračun za količinu prikupljene Sunčeve energije uvrštava radna temperatura površine kolektorskih kanala od $360 \text{ }^\circ\text{C}$), zatim dugoročnog prosjeka optičke djelotvornosti kolektora $\bar{\eta}_{opt}$, dugoročnog prosjeka faktora iskorištenja Sunčeve energije $\bar{\Phi}$ prema *Hottel-Whillierovom* konceptu i prosječne dnevne vrijednosti prikupljene solarne energije $E_{S(coll)}$ ($\text{J/m}^2/\text{dan}$). Pri tome se energija koja je prikupljena kolektorom računa kao razlika energije hemisfernog i difuznog zračenja, dok je veličina dugoročnog prosjeka faktora iskorištenja Sunčeve energije $\bar{\Phi}$ nelinearna funkcija indeksa vedrine K_h i kritičnog omjera energija X .

Da bi se odredila količina proizvedene toplinske energije iz paraboličnih kolektora u realnim uvjetima, radom je odabrana lokacija Otoka Visa koja ima relativno velike količine dozračene energije, a koje iznose 1545 kWh/m^2 godišnje.

Proračuni su napravljeni za jedinične vrijednosti, odnosno za solarno zračenje po 1 m^2 površine aperture kolektora, pri čemu je dobiveno 459.57 kWh/m^2 , a uz učinkovitost pretvorbe iz toplinske u električnu energiju od 35%, dobilo bi se 160.85 kWh/m^2 električne energije.

Jasno je da je dominantan parametar proračuna ulazno solarno zračenje te da, na konkretnoj lokaciji, u studenom, prosincu i siječnju nema dovoljno solarnog zračenja za pogon solarne termalne elektrane. Naime, postoje dani u tim mjesecima kada se može proizvesti toplinska energija, ali ona nije dostatna za pogon solarne elektrane.

Ukoliko bi se radilo o solarnoj termalnoj elektrani na Otoku Visu, onda ona praktički ne bi radila u navedena tri mjeseca u godini. To ne bi bio problem ako bi se ista elektrana spojila na elektroenergetski sustav (što je i najčešći način korištenja energije vjetra – vjetroelektrane se direktno spajaju na elektroenergetski sustav). Međutim, takva solarna termalna elektrana ne bi mogla samostalno kontinuirano napajati cijeli Otok Vis.

Taj problem, nemogućnosti kontinuiranog napajanja potrošača sa solarnim termalnim elektranama se danas rješava na način da se do njih dovode fosilna goriva (najčešće plin) koja proizvode energiju u vrijeme kada nema dovoljno solarnog zračenja. Dakle, po noći, za vrijeme oblačnih dana i nedovoljne količine solarnog zračenja. Međutim, to znači i da današnje solarne termalne elektrane nisu potpuno “*zeleni izvori energije*”, a što se često ispušta iz vida. Postotak udjela fosilnih goriva u ukupnoj proizvodnji energije iz takvih solarnih elektrana naravno ovisi o količini dozračene solarne energije na određenoj lokaciji.

Ovaj problem dodavanja fosilnih goriva solarnoj elektrani prisutan je i kod vjetroelektrana pa se tako dolazi do paradoksa da se s povećanjem učešća obnovljivih izvora energije (solarnih elektrana i vjetroelektrana), ne smanjuje količina korištenja fosilnih goriva, nego se naprotiv ona još i povećava.

Ovaj rad, uz osnovni zadatak proračuna paraboličnih žljebastih kolektora, ima zadatak skrenuti pozornost na ovaj problem, ne samo široj javnosti kojoj ova činjenica uglavnom i nije poznata, nego skrenuti pozornost upravo znanstvenoj i stručnoj javnosti kojoj to također najčešće

i nije poznato, nego se ta zajednica (ne samo u Hrvatskoj) nekritički zalaže samo za što veće učešće obnovljivih izvora energije, pri čemu to učešće algebarski zbraja, dok povećano učešće fosilnih goriva pri tome zanemaruje. To postaje posebno veliki problem jer isto nije poznato niti donosiocima odluke u Hrvatskoj koji u borbi protiv klimatskih promjena nekritički preuzimaju pojmove “adaptation” i “mitigation”, ne shvaćajući da to nisu rješenja problema, nego naprotiv, izbjegavanje rješavanja problema.

Nasuprot takvim stavovima, ovaj rad stoji na stanovištu da je obnovljive izvore energije, a u konkretnom slučaju se to odnosi na solarne termalne elektrane s paraboličnim kolektorima, potrebno integrirati s dovoljno velikim skladištenjima energije jer se jedino tako može osigurati kontinuirana opskrba energijom nekog potrošača.

Dakle, ako bi se na Otoku Visu izgradila solarna termalna elektrana s paraboličnim kolektorima, onda bi se uz nju moralo izgraditi i dovoljno veliko skladištenje energije, a koje se na današnjem stupnju tehnološkog razvoja može osigurati samo reverzibilnom elektranom (kao tehnologiji koja može uskladištiti najveće količine energije); jer bi se tek na taj način mogla osigurati kontinuirana opskrba energijom Otoka Visa tijekom cijele godine. To znači da više ne bi trebao dopunski izvor energije na fosilna goriva, nego bi se ljetni viškovi energije spremali u akumulaciju reverzibilne hidroelektrane za zimske periode (spomenuta tri mjeseca) kada nema dovoljno solarnog zračenja.

Tek takvim pristupom se može govoriti o potpuno “*zelenom izvoru energije*” i postizanju održive zajednice (gradovima i naseljima), odnosno zajednice koja ne treba vanjske izvore energije.

POPIS SIMBOLA:

OZNAKA	JEDINICA	ZNAČENJE
$E_{s\beta}$	kWh/m ² dan	Ukupna (globalna) srednja dnevna ozračenost nagnute plohe
E_{sb}	kWh/m ² dan	Srednja vrijednost dnevne direktne ozračenosti nagnute plohe
E_{sd}	kWh/m ² dan	Srednja vrijednost difuznog ozračenja nagnute plohe
E_{sr}	kWh/m ² dan	Srednja vrijednost albeda na nagnutu plohu
α	m	Visina Sunca (iznad horizonta)
f	m	Duljina žarišne linije
l	m	Duljina aperture paraboličnog žljebastog kolektora
a	m	Širina aperture
ψ	rad	Obodni kut
θ	rad	Upadni kut Sunčevih zraka na aperturu kolektora
C_{opt}		Optički omjer koncentracije
G_{im}	W m ⁻² Hz ⁻¹	Prosječni tok solarnog zračenja integriranog po površini apsorpcijske cijevi kolektora
$G_{b,ap}$	kWh/m ²	Direktno solarno zračenje koje upada na površinu aperture
C_G		Geometrijski omjer koncentracije
$A_{ap,c}$	m ²	Površina aperture kolektora
$A_{ap,r}$	m ²	Površina apsorpcijske cijevi
d	m	Promjer apsorpcijske cijevi
λ	nm	Valna duljina
η_{opt}		Optička efikasnost kolektora
G_c	W m ⁻² Hz ⁻¹	Prosječni tok solarnog zračenja na kolektoru
U_c	W/m ² K	Koeficijent prijenosa topline
T_c	K	Temperatura kolektora
T_{abs}	K	Temperatura apsorpcijske cijevi
q_{use}	J/m ²	Iskoristiva toplinska energija
η_c		Trenutna efikasnost kolektora
$C_{G, max}$		Maksimalni geometrijski omjer koncentracije

n		Indeks refrakcije na površini apsorpcijske cijevi
σ_{tot}	mrad	Ukupno rasipanje Sunčevih zraka
σ_{opt}	mrad	Optička pogreška
σ_{sun}	mrad	Pogreška uslijed geometrijske nesavršenosti Sunca
σ_{con}		RMS kutne devijacije paraboličnog zrcala od savršene parabole
σ_{track}		RMS kutnog rasipanja usred pogreške orijentiranja prema Suncu
σ_{spec}		RMS kutnog rasipanja reflektiranog Sunčeva zračenja usred nesavršenog oblika zrcala
σ_{disp}		RMS kutnog rasipanja usred nesavršenog pozicioniranja zrcala
$\lambda(\theta)$		Koeficijent doprinos zavisan o obodnom kutu longitudinalnih pogreški zrcala prema transverzalnom širenju zračenja
γ		Faktora presijecanja
θ_z	rad	Solarni zenitni kut
δ_s	rad	Sunčev otklon
ω	rad	Satni kut
$Q_{abs,rad}$	J	Toplinski gubitci na apsorpcijskoj cijevi usred radijacije
$Q_{amb,rad}$	J	Toplinski gubitci u okolinu usred radijacije
$Q_{abs,conv}$	J	Toplinski gubitci na apsorpcijskoj cijevi usred konvekcije
$Q_{amb,conv}$	J	Toplinski gubitci u okolinu usred konvekcije
$Q_{abs,cond}$	J	Toplinski gubitci na apsorpcijskoj cijevi usred kondukcije
A	m^2	Površina prijenosa topline
σ	$W m^{-2} K^{-4}$	Stefan-Boltzmannova konstanta
T_{glass}	K	Temperatura staklene cijevi
λ_{cond}	$W m^{-1} K^{-1}$	Termalna konduktivnost izolacijskog materijala
T_{amb}	K	Okolišna temperatura
$A_{rec,act}$	m^2	Aktivna površina reflektora

G_{rec}	kWh m^{-1}	Solarno zračenje na apsorpcijsku cijev
$Q_{glass,refl}$	J	Gubitci vezani za refleksiju na staklenoj cijev
$Q_{abs,refl}$	J	Gubitci vezani za refleksiju na apsorpcijskoj cijevi
$Q_{glass,therm}$	J	Gubitci na staklenoj cijevi
$Q_{glass,conv}$	J	Konvekcijski gubitci na staklenoj cijevi
$Q_{glass,abs}$	J	Toplina apsorbirana na staklenoj cijevi
\bar{Q}	kWh	Prikupljena solarna energija paraboličnih kolektora
F		Faktor djelotvornosti za odvođenje topline
$\bar{\eta}_{opt}$		Dugoročni prosjek optičke djelotvornosti kolektora
$\bar{\Phi}$		Dugoročni prosjeka faktora iskorištenja Sunčeve energije prema Hottel-Whillierovom konceptu
$E_{S(coll)}$	$\text{J/m}^2/\text{dan}$	Prosječna dnevna vrijednost prikupljene solarne energije
$E_{S(h)}$	Jm^{-2}	Prosječno dnevno ozračivanje horizontalne površine hemisfernim zračenjem
$E_{S(d)}$	Jm^{-2}	Prosječno dnevno ozračivanje horizontalne površine difuznim zračenjem
R_h		Vremenski integral hemisfernog zračenja
R_d		Vremenski integral difuznog zračenja
R_{coll}		Omjer srednjeg dnevnog prikupljenog zračenja nagnute plohe „ <i>tracking parabolic collectors</i> “ i horizontalne plohe
ω_{coll}	rad	Satni kut prikupljanja
ω_s	rad	Satni kut zalaza
β	rad	Nagib osi kanala u odnosu na horizontalu
L	rad	Mjesna geografska širina
K_h		Indeks vedrine
$K_{h,d}$		Dnevni indeks vedrine
$K_{h,h}$		Satni indeks vedrine
X		Kritični omjer energija

\bar{q}_u	J/m ² /dan	Gubitak topline s površine kolektorske cijevi
t_c	s	Poluvrijeme prikupljanja
T_{coll}	K	Temperatura površine kolektorskih kanala
$E_{el(ST)}$	kWh	Električna energija solarne elektrane
$\bar{\eta}_{Q-EL}$		Efikasnost pretvorbe toplinske u električnu energiju

LITERATURA

- [1] Obnovljivi izvori energije, Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost
http://www.fzoeu.hr/hr/energetska_ucinkovitost/obnovljivi_izvori_energije/, (pristup 12. veljače 2020.)
- [2] World map of Global Horizontal Irradiance (GHI – source: SolarGIS.info),
<http://www.solarpanelsmelbournevictoria.com.au/the-best-solar-regions-of-the-world/>, (pristup 10. rujna 2019.)
- [3] History, TSK Flagsol
<http://www.heliotrough.com/english/history/history.html>, (pristup 2. veljače 2020.)
- [4] Guenter M., Joemann M., Csambor S., Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 5 Parabolic Trough Technology, Enermena, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.; Institut für Elektrische Energietechnik - Universität Kassel, 2011.
- [5] Photon, German journal for solar technology, 2010.
- [6] E. Lüpfert, Eurotrough collector qualification complete – performance test results from PSA
https://elib.dlr.de/99768/1/EuroTrough_Ises2003_O523_final_.pdf, (pristup 12. veljače 2020.)
- [7] HelioTrough at Kramer Junction with new Cross Over Pipe Design, ResearchGate
https://www.researchgate.net/figure/HelioTrough-R-at-Kramer-Junction-with-new-Cross-Over-Pipe-Design_fig7_273131926, (pristup 2. veljače 2019.)
- [8] Steinhagen M., Gottfried H.M., Rankine cycle
<http://www.thermopedia.com/content/1072/> (pristup 10. veljače 2020.)
- [9] Barišić I., Primjena organskog Rankineovog ciklusa, Diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, rujna 2016.
- [10] Quaschnig, Manuel Blanco Muriel, Solar Power – Photovoltaics or Solar Thermal Power Plants, VGB Congress Power Plants 2001, Brussels, October 10 to 12, 2001.
- [11] Turbine, Operation theory
<https://en.wikipedia.org/wiki/Turbine> (pristup 11. veljače 2020.)
- [12] World Energy Resources Solar 2016., World energy council, 50-51.
- [13] Glasnović, Z., Margeta, K., Seawater Steam Engine as a 'prime mover' for the third industrial revolution, LAP Lambert, Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2017

- [14] Rashid A., Geometrical Aspects of a Parabolic Trough Collector, Use of a Parabolic Trough Collector in the Kingdom of Bahrain Conditions for Water Desalination, Department of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Bahrain
https://www.researchgate.net/figure/Geometrical-Aspects-of-a-Parabolic-Trough-Collector_fig1_328336235, (pristup 4. veljače 2020..godine)
- [15] Kreith F., Kreider J.F., Principles of Sustainable Energy, Boca Raton, Florida, CRC press, Taylor & Francis Group, LLC (2011) 561-572.
- [16] Bellos E., Tzivanidis C., Analytical Expression of Parabolic Trough Solar Collector Performance, Thermal Department, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Zografou,(2018).
- [17] Zallen R., Mahan G.D., Douglas R.W., Amorphous solid
<https://www.britannica.com/science/amorphous-solid>, (pristup 10.veljače 2020.)
- [18] The Study of Root Mean Square (RMS), The Royal Academy of Engineering, 2007.
- [19] Pottler K., Schiel W., Trough Quality Control in large Production Series for Solar Fields, DLR, EuroSun 2004, 14. Internationales Sonnenforum, 2004.
- [20] Tijani A., Modes of heat loss from an evacuated tubular absorber, Numerical Investigation of Thermal Losses from Air Filled Annulus of a Parabolic Trough Solar Collector, 2016.
https://www.researchgate.net/figure/Modes-of-heat-loss-from-an-evacuated-tubular-absorber_fig1_312168697, (pristup 4. veljače 2020.)
- [21] C. Tzivanidis,E.Bellos n, D.Korres,K.A.Antonopoulos,G.Mitsopoulos, Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector, National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, Thermal Department, Athens, Greece, Case Studiesin Thermal Engineering 6 (2015) 226–237
<https://www.raeng.org.uk/publications/other/8-rms>, (pristup 11.veljače 2020.)
- [22] Conduction, Convection and Radiation
<https://www.machinedesign.com/learning-resources/whats-the-difference-between/document/21834474/>, (pristup 7.veljače 2020.)
- [23] Solar thermal power GEEN 4830 – ECEN 5007, Manuel A. Perez S.,
<https://www.slideshare.net/mchhabra27/parabolic-trough>, (pristup 7.veljače 2020.)
- [24] Gee R., Long Term Average Performance Benefits of Parabolic Trough Imporvments, SERI, Golden, CO, SERI, TR 632-439, 1980.

[25] Matusov J., Durcansky P., Lenhard R., The performance measurement o the parabolic trough solar collector, New Developments in Mechanics and Mechanical Engineering, Universtiy of Zilina

[26] Glasnović, Z., Rogošić, M., Margeta, J., A Model for Optimal Sizing of Solar Thermal Hydroelectric Power Plant, Solar energy. 85 (5) (2011), 794-807.

[27] J. Page, The Role of Solar-Radiation Climatology in the Design of Photovoltaic Systems, McEvoy's Handbook of Photovoltaics (Third Edition), (2018.)

ŽIVOTOPIS

██ Osnovnu školu Lučko završio sam 2005. godine nakon čega sam nastavio školovanje u IX. Gimnaziji u Zagrebu, koju sam završio 2011. godine. Iste godine sam upisao Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, smjer Primijenjena kemija. Preddiplomski studij završio sam u rujnu 2016. obranom završnog rada na temu “Oksidacijska desulfurizacija dizelskog goriva ionskim kapljevinama”. Stručnu praksu sam odradio u INA d.d., Sektor istraživanja i razvoja u razdoblju od 1. do 30. srpnja 2016.godine. Također posjedujem diplomu za korištenje računalnog matematičkog programa “Geogebra”.