

# Solarne termoelektrane

---

**Marjanović, Božidar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences / Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:186:603279>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences - FHSSRI Repository](#)



# **Solarne termoelektrane**

**(završni rad)**

**Rijeka, 2017. godine**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**

**FILOZOFSKI FAKULTET U RIJECI**

Studijski program: **Sveučilišni preddiplomski studij politehnike**

**Božidar Marjanović**

Mat. Broj: 0009019482

**Solarne termoelektrane**

**-završni rad-**

**Mentor: dr.sc. Tomislav Senčić**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**FILOZOFSKI FAKULTET U RIJECI**

**Odsjek za politehniku**

**Božidar Marjanović**

**Rijeka, 2017. godine**

**FILOZOFSKI FAKULTET U RIJECI**

**Odsjek za politehniku**

U Rijeci, 21.9.2017.

## **ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD**

Pristupnik: **Božidar Marjanović**

Studij: **Sveučilišni preddiplomski studij politehlike**

Naslov završnog rada: **Solarne termoelektrane**

Kratak opis zadatka:

Sunčeva energija može se iskoristiti na različite načine. Jedan od načina su solarne termoelektrane. Opisati različite načine iskorištavanja sunčeve energije. Opisati princip rada solarnih termoelektrana i proanalizirati prednosti i mane naspram ostalim načinima iskorištenja sunčeve energije. Izvesti proračun stupnja djelovanja hipotetskog postrojenja uključivši solarni i parnoturbinski dio.

Zadatak uručen pristupniku: 15.6.2015.

Ovjera prihvatanja završnog rada od strane mentora \_\_\_\_\_

Završni rad predan: \_\_\_\_\_

Datum obrane završnog rada: \_\_\_\_\_

Članovi ispitnog povjerenstva:

1. Predsjednik - \_\_\_\_\_
2. Mentor - \_\_\_\_\_
3. Član - \_\_\_\_\_

Konačna ocjena: \_\_\_\_\_

Mentor

\_\_\_\_\_  
dr. sc. Tomislav Senčić

## **Izjava**

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, isključivo znanjem stečenim na Filozofskom fakultetu u Rijeci, odsjeku za Politehniku, služeći se navedenim izvorima podataka te uz stručno vodstvo mentora prof. dr. sc. Tomislava Senčića.

U Rijeci, 2017.

## **Sažetak**

U ovom se radu čitatelje uvodi kroz povijest korištenja solarne energije. Ukratko su opisani najučestaliji načini korištenja solarne energije. U glavnom teoretskom dijelu slijedi detaljniji tematski opis Solarnih termoelektrana: princip rada, vrste solarnih termoelektrana, njihove mane i prednosti te utjecaji na okoliš. Na kraju se nalazi prikaz proračuna iskoristivosti jedne hipotetske solarne termoelektrane pripadajućom shemom .

## Sadržaj:

<b>1. Uvod</b> .....	8
1.1.Solarna energija.....	8
1.2.Korištenje sunčevog zračenja u antičko doba.....	8
1.3.Moderni razvoj korištenja solarne energije.....	9
1.4.Aktualna solarna tehnologija.....	9
1.4.1.Pasivni solarni sustavi.....	9
1.4.2.Aktivni solarni sustavi.....	10
1.4.3.Fotonaponske ćelije.....	10
1.4.4.Solarni kolektori.....	12
1.4.5.Tehnologija koncentrirajućeg sunčevog zračenja.....	13
1.5.Prednosti i mane korištenja solarne energije.....	14
1.5.1.Ekonomske utjecaji solarne energije.....	15
1.5.2.Socijalni utjecaj korištenja solarne energije.....	15
1.5.3.Nedostatci korištenja solarne energije.....	15
<b>2. Načelo rada solarnih termoelektrane</b> .....	15
2.1.Temelji korištenja energije sunčeva zračenja u solarnim termoelektranama.....	17
<b>3. Vrste solarnih termoelektrana</b> .....	19
3.1.Solarne termoelektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima.....	19
3.1.1.Karakteristični parametri paraboličnih žljebastih kolektora.....	22
3.1.2.Izvedbe solarnih elektrana s paraboličnim žljebastim kolektorima.....	23
3.1.3.Primjeri solarnih elektrana s paraboličnim žljebastim kolektorima.....	25
3.2.Solarne termoelektrane sa središnjim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata.....	26
3.2.1.Osnovne izvedbe solarne termoelektrane sa središnjim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata.....	27
3.2.2.Primjeri solarnih termoelektrana sa središnjim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata.....	29
3.3. Solarne termoelektrane s paraboličnim tanjurastim kolektorima.....	30
3.3.1.Primjeri solarnih termoelektrana s paraboličnim tanjurastim kolektorima.....	31
3.4. Solarne termoelektrane s Fresnelovim reflektorima.....	32
3.5. Solarne dimnjačne termoelektrane.....	33
3.5. Solarno jezero-elektrana.....	36
<b>4. Uskladištenje solarne energije</b> .....	36
<b>5. Utjecaj solarnih termoelektrana na okoliš</b> .....	40
<b>6. Usporedba solarnih termoelektrana s ostalim elektranama</b> .....	41
<b>7. Proračun iskoristivosti na primjeru hipotetske solarne termoelektrane s crtežom sheme postrojenja</b> .....	43
<b>8. Zaključak</b> .....	51
<b>9. Literatura</b> .....	52



# 1. Uvod

## 1.1. Solarna energija

Solarna energija je energija dobivena iz sunčeva zračenja. Koristi se za dobivanje električne struje, zagrijanje i hlađenje zgrada, te grijanje i dobivanje tople vode. Također, sunčeva se energija koristi tisućama godina od prije iako to sam čovjek uzima zdravo za gotovo.

Ne smijemo zanemariti utjecaj sunčeva zračenja u biološkim lancima i biološkoj izmjeni tvari i energije. Sunčevo zračenje praktički je najbitniji faktor u procesu fotosinteze, čime se stvaraju hranjivi sastojci energetske vrijednosti poput šećera, ali i kisik, potreban element za disanje, što čini solarnu energiju posrednim izvorom života za sve organizme na Zemlji. Time je sunčeva energija odgovorna i za nastanak nekih drugih sekundarnih izvora energije kao što su biomasa ali i fosilna goriva.

Toplina Sunca također utječe na meteorološke prilike na Zemlji čime je odgovorna za nastanak vjetrova odnosno energije vjetra. Jedini energetske izvori na Zemlji koji nisu pod utjecajem solarne energije su radiaktivnost u zemljinoj kori, odnosno nuklearna fuzija i fisija nekih radioaktivnih elemenata, te energija plime i oseke uzrokovana gravitacijom Mjeseca.

Naime, ove činjenice, iako možda nama banalne, bitan su nam podsjetnik koliko je Sunce i njegovo zračenje moćan i bitan izvor energije koji u biti, nije niti blizu iskorišten od strane čovjeka, koliko bi u zbilji mogao biti.

## 1.2. Korištenje sunčevog zračenja u antičko doba

Što se tiče korištenja sunčeva zračenja u antičko doba, već drevni Grci uvidjeli su mogućnost korištenja sunčeva zračenja za pasivno grijanje i hlađenje doma bez ikakvih dodatnih uređaja i strojeva. Filozof Sokrat opisao je kako kuća treba biti postavljena kako bi se zimi grijala a ljeti hladila. To saznanje su nadalje slijedile kasnije rimska i kineska kultura.

Kod drevnih Rimljana vrijedi istaknuti to da su za zagrijavanje svojih javnih kupališta koristili crne ploče koje su apsorbirale sunčevo zračenje i preko kojih bi tekla voda koja bi se time ujedno i zagrijavala. Rimski arhitekt Vitruvius izradio je planove kupališta koje koristi pasivni solarni dizajn za zagrijavanje zgrade.

U ruševinama grada Ninevaha koji je bio dio drevne Asirije nađena su stakla, odnosno velika i jaka povećala koja su služila za paljenje vatre kao još jedan dokaz korištenja sunčeva zračenja. Sunčeve zrake su se koncentrirale u svrhu dobivanja jedne snažne vrlo vruće zrake koja je mogla stvoriti željenu vatru na određenim predmetima.

### 1.3. Moderni razvoj korištenja solarne energije

Solarna energija je već nekoliko stoljeća korištena u znanstvene svrhe. Znanstvenik, Joseph Priestly (1733–1804), upotrebljavao je sunčevo zračenje za svoja postignuća i izolaciju kisika. Zagrijavao je i razbio molekule živinog oksida upotrebljavajući koncentrirano sunčevo zračenje.

U ranijim godinama 19. stoljeća došlo je i do uporabe 'zelenih kuća'. Zelena kuća je, naime, stambeni objekt ali i ujedno pasivni solarni kolektor koji skuplja sunčevo zračenje u svrhu rasta biljaka. Takva kuća zadržavala je energiju sunčevih zraka odnosno nastalu toplinu i uz postojeću vlažnost koja je služila za hidriziranje biljaka omogućavala je nesmetan rast istih čak i zimi kada u prirodnom okruženju nisu mogle rasti.

Nadalje, tokom 19. i 20. stoljeća razvijale su se tehnologije i primjene fotonaponskih ćelija, solarnih kolektora, tanjurastih (dish) i paraboličnih solarnih sustava, kao i sustava sa sabirnim tornjem.

### 1.4. Aktualna solarna tehnologija

Solarna tehnologija se može podijeliti na pasivne i aktivne sustave. Pasivni solarni sustavi uključuju samo sunčevo zračenje bez ikakve uporabe ostalih formi energije. Dok aktivni uključuju dodatne mehanizme kao što su pumpe i generatori koji služe za pretvaranje i dodavanje nastale odnosno dobivene sunčeve energije. Aktivni sustavi obično služe za dobivanje električne energije i topline dok sustavi za grijanje vode mogu biti i aktivni i pasivni.

#### 1.4.1. Pasivni solarni sustavi

Pasivni solarni sustavi uglavnom se odnose na dizajniranje kuća i zgrada te njihovo pozicioniranje u smislu osvjetljavanja i štednje dodatne energije u svrhu grijanja i hlađenja. Primjer takvog korištenja Sunčevog zračenja prikazan je sl.1.1.



Sl.1.1. Primjer pasivnog korištenja Sunčevog zračenja [1]

Obraća se i pozornost na izvedbu prozora, izolacije i ventilacije kod takvog dizajniranja kako bi se potencijalna Sunčeva energija što više neposredno iskoristila.

Još jedan način pasivnog korištenja solarne energije su solarni kolektori načinjeni od tamno premazanog metala koji služe zagrijavanju zgrada preko zraka koji cirkulira kroz kolektor i unutrašnjost zgrade.

#### 1.4.2. Aktivni solarni sustavi

Aktivni solarni sustavi uključuju:

- Fotonaponske ćelije,
- Solarne kolektore (paneli) ,
- Koncentrirajući solarni sustavi.

**Fotonaponske** ćelije služe pretvaranju sunčeve energije direktno u električnu unutar same ćelije. Najprilagodljiviji su od svih solarnih sustava i ne iziskuju direktno sunčevo zračenje za generiranje struje. Mogu se postavljati na različita mjesta: zgrade, kuće, vanjske uređaje. I time ujedno biti namjenski orijentirane dotičnom objektu i upotrebi. No, mogu biti postavljene i kao fotonaponske farme odnosno imati ulogu solarne elektrane.

**Solarni kolektori** se obično najčešće koriste za zagrijavanje vode u kućama i zgradama ali ponekad i za zagrijavanje i hlađenje prostorija. Iako se neki kolektori koriste u pasivnim solarnim sustavima češća je upotreba kroz aktivne sustave budući je uobičajeno uz njih koristiti razne toplinske pumpe i ostale uređaje za efikasnije dovodenje topline.

**Koncentrirajući solarni sustavi** služe za zagrijavanje vode i pretvaranje vode iz tekućeg stanja u paru u svrhu pokretanja turbina kod proizvodnje električne energije. Služe proizvodnji električne energije na većoj skali od fotoelektričnih ćelija. Kao takvi koriste se u svrhu proizvodnje struje za veća industrijska postrojenja ili za poslove i potrošače velikih razmjera. Karakteristično je to da koriste efekt zrcala kako bi se koncentriralo sunčevo zračenje u svrhu dobivanja željene veće topline.

#### 1.4.3. Fotonaponske ćelije

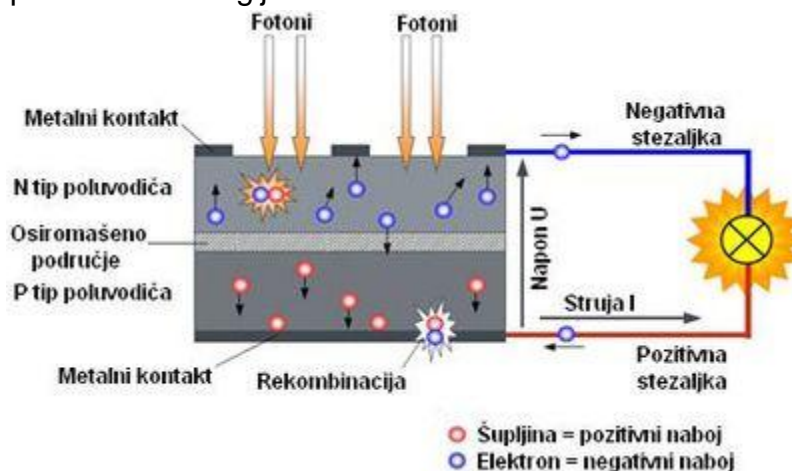
Alexandre-Edmond Becquerel 1839. otkrio je fotoelektrični (fotonaponski) efekt što je bilo pokretač osmišljavanja tehnologije fotonaponskih ćelija i dobivanja električne struje na taj način. Do pronalaska je došao dok je vršio eksperiment na elektrolitičnoj ćeliji. Ćelija je bila načinjena od fotoosjetljivog materijala sastavljenog od dvije metalne elektrode uronjene u električki vodljivu otopinu (elektrolit). Čim se tu ćeliju izložilo sunčevoj svjetlosti potekla je i električna struja.



Sl. 1.2. Postrojenje fotonaponskih ćelija [2]

Becquerel je inspirirao time i mnoge druge znanstvenike da nastave raditi na fotoelektričnom efektu. Sljedeće otkriće na tom polju došlo je od znanstvenika Willoughby Smith-a (1828–1891) 1873. godine, koji je pronašao fotoelektričnu provodljivost selena. Nadalje, četiri godine kasnije dva znanstvenika William G. Adams and R. E. Day, došli su do saznanja da bi selenij u čvrstom stanju mogli koristiti kod fotonaponskog efekta. Naime, njihova, prvobitna ćelija mogla je pretvoriti tj. iskoristiti samo 1% svjetlosne energije u električnu. Iako je ćelija Adams-a i Day-a bila vrlo limitirana, američki znanstvenik Charles Fritts 1883. godine izradio je fotonaponsku ćeliju koja je bila izrađena od selenijskih vafra koja je bila nešto učinkovitija.

Krajem 19. i početkom 20. stoljeća radilo se na razvoju tih ćelija, no tek 1954. načinjena je prva fotonaponska ćelija koja je bila dostatna praktičnoj primjeni. Ta ćelija načinjena je u Bell laboratoriju od strane tri znanstvenika: Calvin Fuller, Daryl Chapin i Gerald Person. Oni su istraživali učinak fotonaponske ćelije načinjene od silicijskih kristala. Rezultat je bio taj da je takva ćelija od sunčeva zračenja proizvodila veliku količinu električne struje. Budući se sve od tada pa do danas koriste fotonaponske ćelije na bazi silicijskih kristala ta je ćelija postala i ostala temelj svih kasnijih fotonaponskih ćelija. Recimo za primjer samo to da je izvedba satelita neizbježna bez takvih ćelija od tadašnjih dana čime se sateliti pogone u zemljinoj orbiti i oskrbljuju potrebnom energijom.



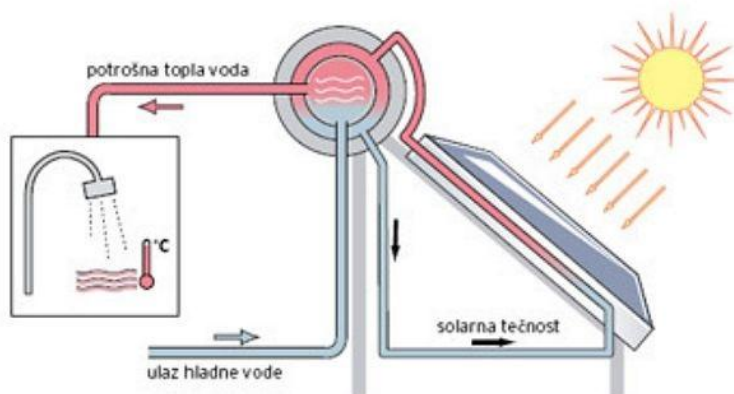
Sl.1.3. Shematski prikaz fotoelektričnog efekta u fotonaponskoj ćeliji [3]

#### 1.4.4. Solarni kolektori

U 80-im godinama 19. stoljeća francuski inženjer Charles Tellier utjecao je na razvoj solarnih kolektora. Dizajnirao je prvi nereflektirajući solarni kolektor. Taj kolektor bio je sastavljen od deset ploča. Svaka je ploča bila sastavljena od dva željezna plašta koje su bile povezane. Dok su ploče bile povezane cijevima kako bi formirale solarni kolektor. Za toplinski medij u cijevima umjesto vode koristio je amonijak zbog manje točke ključanja. Kad je takav kolektor izložio sunčevu zračenju na krovu svoje kuće on je ispustio amonijak u plinovitom stanju. Takav plin amonijaka pod povećanim tlakom služio je za pogon vodene pumpe koja je u sunčanim satima iz izvora mogla crpiti i do 1000 litara dnevno. Taj pronalazak omogućio je razvijanje tehnologije zamrzavanja. Tellierova zamisao je bila da svaki krov u sjevernoj hemisferi okrenut prema jugu posjeduje takav kolektor čime se iznatan doprinjelo jednostavnom energetsom snabdjevanju tih kuća, a najveću beneficiju od toga bi imale kuće u Africi gdje bi se ujedno riješio problem oskudice i visoke cijene energije u tim domaćinstvima. Takva ideja je još aktualna ali i nažalost, još uvijek uveliko nerealizirana.



Sl.1.4. Solarni paneli na krovu kuće [4]



Sl.1.5. Pojednostavljeni prikaz korištenja solarnog panela za zagrijavanje vode [5]

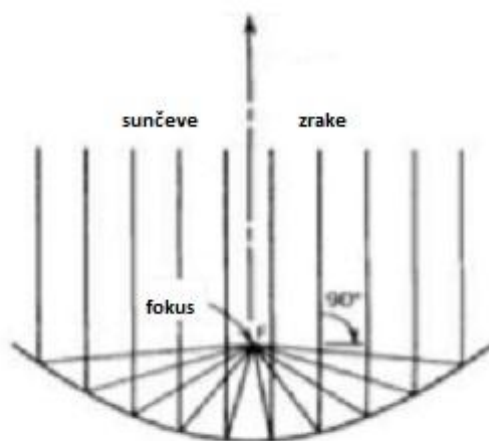
#### 1.4.5. Tehnologija koncentrirajućeg sunčevog zračenja

Bit ove tehnologije se zasniva na korištenju optičkog svojstva zrcala pomoću čega se upadne zrake (Sunca) koncentriraju u jednu točku, tj. fokus, čime se u toj točki ujedno i željeno dovodi visoka toplina budući se iz svjetlosne energije Sunca velikim dijelom pretvara u toplinu zbog fizikalnog efekta crnog tijela.

Sredinom 19.stoljeća francuski inženjer Auguste Mouchout patentirao je izum koji je je koristeći solarnu energiju stvarao paru. Mouchout je za taj izum koristio tanjur za koncentriranje sunčevih zraka. To je ujedno bila i prva verzija tanjurastog solarnog sustava. Mouchout-a je rad na takvom projektu nagnala zabrinutost da je njegova zemlja tada bila previše ovisna o ugljenu kao glavnom energentu.

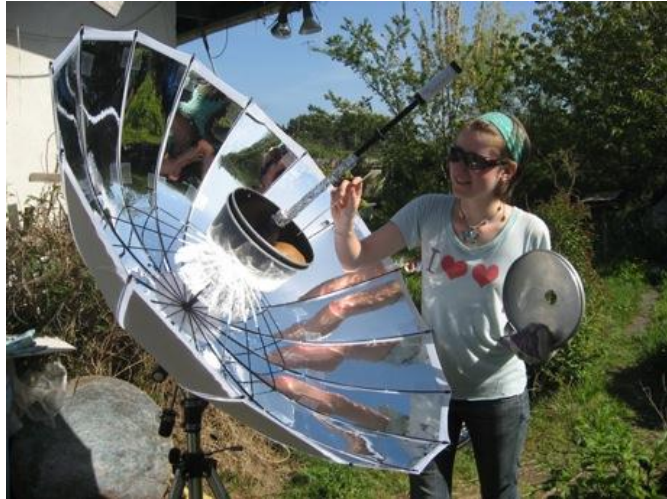
Mouchout-ov izum vodio je do razvoja tanjurstih sustava preko drugih znanstvenika kao što je bio John Ericsson. Ericsson je, naime, unaprijedio dizajn Mouchot-ovog patenta. Dio za reflektiranje zraka s prethodnog tanjurastog oblika promjenio je u kombinaciju tanjurastog i stožastog oblika. Ericsson je nadalje takav oblik reflektora promjenio u parabolični te koncentrirao sunčeve zrake na jednoj liniji uzduž takvog reflektora. Iako takav oblik nije imao efikasnost poput tanjurastog bio je potpuno funkcionalan i lako izvediv.

Američki znanstvenik Aubrey Eneas pred kraj 19. stoljeća je osmislio drugačiji način sakupljanja sunčevog zračenja u jednu točku i time otvorio novu tehnologiju u tom polju. Njegova tehnologija se sastojala od puno ravnih zrcala smještenih u polukrug oko sabirnog tornja na čijem su se vrhu u praktično jednu točku sakupljale sunčeve zrake reflektirane sa svih tih zrcala.



Sl.1.6. Shematski prikaz koncentriranja sunčevih zraka pomoću konkavnog zrcala [6]





Sl.1.7. Tehnologija koncentrirajućeg solarnog zračenja u primjeni kuhanja[7]

Kasnije pa sve do danas taj se oblik korištenja solarne energije neprestano razvija i pospješuje kroz različite detalje: dizajn, materijale, korištenje motora za praćenje sunčevih zraka itd. No o tome u jednom od narednih poglavlja budući da ćemo se ovom temom posebno pozabaviti jer se na ovoj tehnologiji zasniva i rad solarnih termoelektrana.

### **1.5. Prednosti i mane korištenja solarne energije**

Jedna od prednosti koju možemo istaknuti na prvom mjestu je ta da je to energija obnovljivog izvora. Sunčevo zračenje je praktički dostupno svugdje na planetu i to besplatno. Energija i njezino iskorištavanje je vrlo čisto i ekološki prihvatljivo.

No, postoje i brojni nedostaci. Najznačajniji je taj da je iskorištavanje takve energije još relativno vrlo skupo iako s vremenom postaje sve jeftinije. Tehnološka izvedba samih uređaja i sustava je vrlo skupa kao što je izgradnja solarnih tornjeva, dok je izrada solarnih kolektora i fotonaponskih ćelija skupa u odnosu na dobivenu energiju preko njih.

Drugi veliki problem predstavlja neravnomjerni raspored sunčeva zračenja po površini Zemlje. Primjerice, postoje mjesta s mnogo oblačnih dana i nedostatkom potrebnih sunčanih sati što ograničava uporabu određenih solarnih sustava. Tako dostupnost sunčeve energije nije razmjerna potrebama na svim lokacijama.

Kod nekih sustava kao što su sustavi koncentriranog zračenja koji se ostvaruju s velikim brojem ogledala i time zahtijevaju veliku površinu za svoju izvedbu problem je nedostatak slobodnog prostora.

### *1.5.1. Ekonomski utjecaji solarne energije*

Korištenje solarne energije stvara veću energetska neovisnost kod zemalja koje takvu energiju više koriste jer se time umanjuje uvoz ostalih energetskih resursa koji se nadomještaju energijom iz solarnih sustava. Nadalje, budući da se za solarne sustave trošak odnosno ulaganje odnosi samo na konstrukciju i materijale za izradu takvih sustava a ne i za nabavu goriva čiji nedostatak može biti razlog za ovisnost o uvozu, takav izbor za solarni sustav omogućuje da tok novca ostane unutar države ako se uzme u obzir pretpostavka da su unajmljeni radnici lokalnog stanovništva te da se materijali za potrebnu konstrukciju izrađuju u toj zemlji.

### *1.5.2. Socijalni utjecaj korištenja solarne energije*

Korištenje solarne energije omogućilo bi snabdjevanje energijom i ona mjesta kojima do sada nije to bilo omogućeno, tj. nisu se mogla snabdjevati iz komunalne mreže. To su uglavnom siromašnija mjesta čime bi se na ovaj način olakšao život na tim lokacijama gdje bi se ta mjesta mogla financijski pokrenuti a time naposljetku i potpuno oživiti.

### *1.5.3. Nedostaci korištenja solarne energije*

Dva glavna problema se javljaju u korištenju solarne energije. To su iskoristivost i cijena. Naime, iskoristivost solarne energije još uvijek nije na razini koja je potrebna da bi se koristila u širokim proporcijama. S druge strane, cijena korištenja solarne energije još uvijek nije na povoljnjoj razini koja je obećana od nekih kompanija i istraživača. Iako je tehnologija ostvarena i postala fizički dostupna, tehnologija nije razvijena do te mjere da bude i cijenom vrlo dostupna. Trenutno rješenje bi moglo biti umanjivanje takse za korištenje i ulaganje u takve projekte.

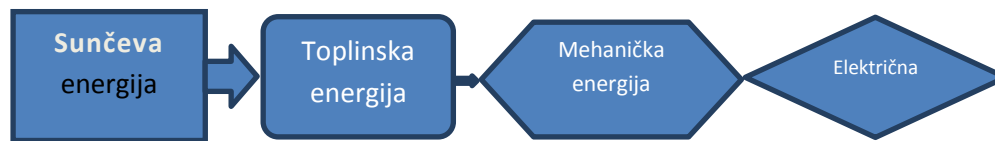
Zasad je korištenje solarne energije na manjoj razini vrlo uspješno, no da bi se moglo reći kako je korištenje takve energije u potpunosti uspješno trebat će se korištenje takve energije dovesti na višu tvorničku razinu odnosno masovniju proizvodnju.

## **2. Načelo rada solarnih termoelektrana**

Kako bi se dobila potrebna toplinska energija za rad termoelektrane za razliku od ostalih konvencionalnih termoelektrana solarne termoelektrane ne koriste se gorivom (fosilnim, nuklearnim i ostalim) već sunčevim zračenjem kao izvorom energije. Nadalje se, kao i kod ostalih konvencionalnih termoelektrana, preko termodinamičkih procesa prvo potencijalna energija dobivene pare tj. toplinske unutrašnje energije pretvara u kinetičku energiju mlaza pare, gdje se zatim kinetička energija u turbini pretvara u mehanički rad odnosno mehaničku energiju, a na



poslijetku ta mehanička energija u generatoru pretvara se u električnu koja se raznim vodovima doprema do potrošača.



Sl.2.1. Slijed pretvorbe energije u solarnoj termoelektrani

Dakle, načelo rada solarne termoelektrane kao kod konvencionalne termoelektrane temelji se na toplinskom stroju koji pretvara toplinu, koju daje neki energetski izvor (Sunce, fosilno gorivo, biomasa, nuklearno gorivo), u mehaničku energiju pritom dajući otpadnu toplinu koja predstavlja gubitak pri korištenju energije.

Toplinski stroj sastoji se od tri osnovna dijela: radnog medija (fluida), toplinskog spremnika na višoj temperaturi (energetski izvor) i toplinskog spremnika na nižoj temperaturi (atmosfera, rijeka, more). Radni medij se zagrijava, zatim isparava i eventualno pregrijava te ekspandira u turbini i naposljetku ponovo kondenzira. Za pretvorbu topline u mehaničku energiju kao termodinamički procesi koriste se Rankienov, Stirlingov ili Braytonov proces.[35]

Kao bitnu karakteristiku tog toplinskog stroja uzimamo njegov stupanj djelovanja ( $\eta$ ):

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2.1)$$

$Q_1$ - toplinska energija ogrjevnog spremnika (toplina koju stroj prima od ogrjevnog spremnika tj. izvora energije)(J),

$Q_2$ - toplinska energija rashladnog spremnika (toplina koju stroj predaje rashladnom spremniku tj. okolini)(J),

$W$ - rad toplinskog stroja (mehanička energija predana generatoru) (J) .

Stupanj djelovanja može se napisati i kao:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2.2)$$

gdje je:

$T_1$  - termodinamička temperatura ogrjevnog spremnika ( ulazna temperatura)(K),

$T_2$ - termodinamička temperatura rashladnog spremnika (izlazna temperature)(K),[35].

Iz izraza (2.1) i (2.2) vidi se da stupanj djelovanja toplinskog stroja ( $\eta$ ) uglavnom ovisi o toplinskoj energiji odnosno temperaturama ogrjevnog i rashladnog spremnika[35]. No, u stvarnom radu toplinskog stroja stupanj djelovanja ovisi i o trenju niza komponenata za pretvorbu topline u mehaničku, izolaciji, vanjskim toplinskim čimbenicima itd.

Opet, kombinirani sustav proizvodnje električne i toplinske energije povećava stupanj djelovanja s 35% koji se postiže kod konvencionalnih termoelektrana, na 60%. Ukoliko se može iz tog sustava dobiti i rashladna energija, stupanj djelovanja

se povećava i do 85% [35]. Dok toplinska energija ima tzv. nižu vrijednost a električna tzv. višu, iz tog razloga nije opravdano koristiti električnu energiju za grijanje i potrošnu vodu u široj primjeni već samo u posebnim slučajevima. Za takve potrebe valja koristiti toplinsku energiju koja proizlazi neposredno iz toplinskog stroja.

## 2.1. Temelji korištenja energije sunčeva zračenja u solarnim termoelektranama

Kod običnih kolektora, ravnih (pločastih) i vakuumskih mogu se dobiti temperature do oko 150°C [35]. No, to nije dovoljno za veću industrijsku primjenu, tj. pogon solarnih termoelektrana. Kako bi se dobile više temperature radnog medija za željeni pogon moraju se koristiti koncentrirajući kolektori koji s pomoću zrcala ili leća fokusiraju Sunčevo zračenje u točku ili dio pravca, pri čemu se na tom mjestu dobivaju mnogostruko više temperature.

Bitan faktor koji nam služi za određivanje koncentriranja Sunčevog zračenja odnosno karakteristiku koncentrirajućih kolektora je omjer koncentriranja ( $R$ ). To je omjer između površine otvora kolektora koji prima Sunčevo zračenje i površine apsorbera koji prima koncentrirano zračenje. Iz toga se odmah da zaključiti kako je omjer koncentriranja za ravni kolektor jednak iznosu jedan, dok za koncentrirajuće kolektore može iznositi u rasponu od 2 do 1000.

Kao mjerilo za karakteristiku koncentrirajućeg kolektora uzimamo stupanj djelovanja kolektora ( $\eta_k$ ) koji se dobiva sljedećim matematičkim izrazom:

$$\eta_k = F_R \left( \rho\gamma(\tau\alpha)_{ef} - \frac{\varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{RG_b} \right) \quad [46] \quad (2.3)$$

a budući da je  $T_1^4 \gg T_2^4$ , član  $T_2^4$  ne čini veliku razliku pa radi jednostavnijeg računanja možemo umjesto  $(T_1^4 - T_2^4)$  pisati samo  $T_1^4$  odnosno  $T^4$ , pa dobivamo konačan izraz:

$$\eta_k = F_R \left( \rho\gamma(\tau\alpha)_{ef} - \frac{\varepsilon\sigma T^4}{RG_b} \right) \quad [46] \quad (2.4)$$

gdje je:

$F_R$  -emisijski faktor,

$\rho$  -refleksijski faktor površine reflektora (zrcala),

$\gamma$  -faktor koji određuje koliki dio reflektirane energije od reflektora dođe na apsorber,

$(\tau\alpha)_{ef}$ -efektivni produkt transmisijskog faktora cijevi u kojoj je apsorber i apsorpcijskog faktora apsorbera,

$R$  - omjer koncentriranja kolektora,

$G_b$  - izravno sunčevo zračenje (W/m<sup>2</sup>K),

$\varepsilon$  - toplinski emisijski faktor apsorbera,

$\sigma$  - univerzalna konstanta zračenja crnog tijela koja iznosi  $5.67 * 10^{-8}$ W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>,

$T$  - radna temperatura (K).[35]

Izravno sunčevo zračenje ( $G_b$ ) na vodoravnu ili nagnutu plohu može se naći u tablicama koje pokazuju sunčevo zračenje u određenom periodu i koje izrađuje aktinografska struka, specijalizirani dio meteorologije koji se bavi sunčevim zračenjem. A dok se samo mjerenje sunčevog zračenja obavlja pirheliometrom.

Za više temperature radnog medija potreban je veći koncentrirajući omjer. Nadalje, kolektore koncentrirajućeg omjera oko 10 i manje potrebno je povremeno, sezonski zakretati, dok kolektore većih omjera koncentriranja valja stalno okretati precizno prateći gibanje Sunca kako bi dobili što veću temperaturu radnog medija i time potrebnu učinkovitost kolektora, što opet povećava tehničku složenost a time i cijenu izvedbe. Solarne termoelektrane koriste uglavnom visokotemperaturnu toplinu izravnog sunčevog zračenja iz koncentrirajućih solarnih kolektora za proizvodnju električne energije. Solarne termoelektrane može raditi kogeneracijski, odnosno uz proizvodnju električne energije proizvoditi i toplinu za grijanje (solarne termoelektrane-toplane), a može i trigeneracijski, ako se uz sve to, još generira i energija potrebna za hlađenje.

Posljednja pretvorba ili niz pretvorbi u proizvodnji električne odvija se tako da toplinski stroj pretvara toplinu u mehaničku energiju. Toplina prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature, čime se ostvaruje rad. Takvi procesni ciklusi odvijaju se u toplinskim strojevima kao što su postrojenja termoelektrana pa tako i solarnih termoelektrana.

Specifična odnosno jedinična toplina koja se izmjenjuje tijekom takvog procesa je:

$$q = q_1 - q_2 = q_{\text{dov}} - q_{\text{odv}} \quad [35] \quad (2.5)$$

$q_1(q_{\text{dov}})$  - specifična dovedena toplina procesu (J/kg)

$q_2(q_{\text{odv}})$  - specifična odvedena toplina procesu (J/kg).

Primjećujemo da je izraz analogan izrazu (2.1) samo što je toplinska energija svedena na jediničnu masu tj. J/kg [35].

Ukupan stupanj djelovanja solarne termoelektrane ( $\eta_{\text{uk}}$ ) bit će rezultat umnoška stupnja djelovanja koncentrirajućeg kolektora ( $\eta_k$ ) sa stupnjem djelovanja Carnotovog desnookretnog procesa ( $\eta$ ) u parnoturbinskom dijelu, ali i sa svim dodatnim gubicima ( $\eta_s$ ) na izolaciji, trenju, pumpama, izmjenjivaču i petvorbi topline itd. :

$$\eta_{\text{uk}} = \eta \eta_s \eta \quad (2.6)$$

U realnoj situaciji to iznosi negdje oko:

$$\eta_{\text{uk}} = 0,35 \eta_k \quad [35] \quad (2.7)$$

### 3. Vrste solarnih termoelektrana

Kada se spominje izraz solarne termoelektrane, ili u nekoj literaturi sunčeve termičke elektrane odnosno sustavi, uglavnom se pomisli na sustave koncentrirajućeg sunčevog zračenja, što se iz dosadašnjeg pisanja praktički moglo poistovjetiti. No, to je samo jedan od načina ili tehnika kako solarna termoelektrana može biti ostvarena. U tu skupinu koncentrirajućih solarnih sustava spadaju sljedeće solarne termoelektrane:

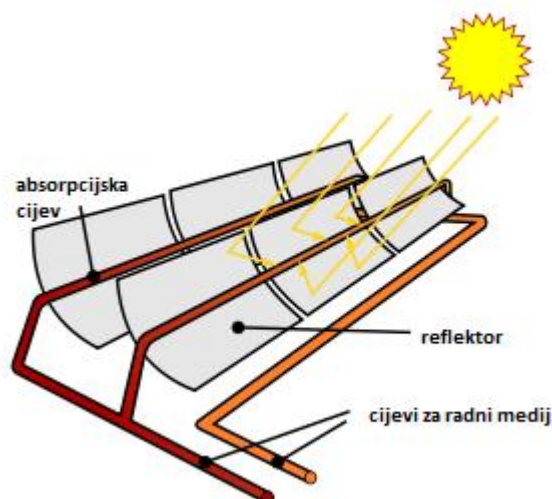
- s paraboličnim žljebastim kolektorima,
- sa središnjim (centralnim) prihvatnikom na tornju i poljem heliostata,
- s paraboličnim tanjurastim kolektorima,
- s Fresnelovim kolektorima.

Solarne termoelektrane koje ne spadaju u tu skupinu koncentrirajućih solarnih sustava su:

- solarna dimnjačna (uzgonska) elektrana i
- solarna termoelektrana izvedena uz pomoć solarnog jezera (solarna termoelektrana - jezero)

#### 3.1. Solarne termoelektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima

Ovakve elektrane su najčešće instalirana postrojenja kad se o solarnim termoelektranama govori. Sastoje se od dugih paralelnih zrcala savijenih u žlijeb (korito) koja prate Sunce obično oko osi sjever-jug kako bi se što bolje iskoristilo direktno sunčevo zračenje. Sunčeve zrake fokusiraju se na cijev smještenu u žarište (fokus) zrcala paraboličnog kolektora.



Sl.3.1. Jednostavni prikaz funkcioniranja paraboličnog žljebastog kolektora [8]

Iz ovog vidimo da je to slučaj koncentriranja sunčevog zračenja na dio pravca odnosno liniju. Parabolična zrcala, koja se ovdje koriste, odbijaju izravno sunčevo

zračenje koncentrirajući ga na linijski prijarnik, u ovom slučaju cijev koja se nalazi u žarištu zrcala. Koncentrirano zračenje tako zagrijava medij koji struji tom cijevi pri čemu se sunčeva energija pretvara u toplinsku te prenosi na medij. Parabolični žljebasti kolektori pogodni su za rad na temperaturama od 150°C do 500°C.

Rotiranje kolektora oko osi sjever-jug kako bi se pratila putanja Sunca pokreće pogonska jedinica koja može pokretati cijeli red kolektora a upravlja se iz središnje kontrolne jedinice.



Sl.3.2. Postrojenje s paraboličnim žljebastim kolektorima [9]

Postoje dva načina rada središnje kontrolne jedinice:

- kontrolna jedinica temeljena na osjetniku praćenja Sunca odnosno njegova svjetlosnog inteziteta,
- kontrolna jedinica temeljena na astronomskom algoritmu. [35]

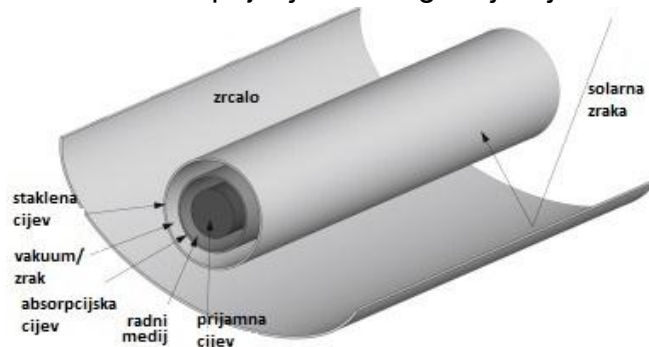
Kontrolna jedinica temeljena na osjetniku praćenja Sunca koristi fotoćelije za pronalaženje položaja Sunca, dok kontrolna jedinica temeljena na astronomskom algoritmu računa Sunčev vektor koristeći precizne matematičke proračune za pronalaženje nagiba Sunca i azimuta prema čemu se određuje nagib kolektora i upravlja tim nagibom preko pogonskih jedinica. [35]

Većina komercijalnih paraboličnih kolektora koristi jednoosne sustave dvodimenzionalnog praćenja Sunca, dok su dvoosni sustavi trodimenzionalnog praćenja Sunca skuplji i još uvijek ekonomski neisplativiji pa zbog toga još nisu u masovnijoj uporabi iako dvoosni sustav omogućuje najoptimalnije kontinuirano praćenje najvećeg sunčevog zračenja u datom trenutku. No, s druge strane, povećavaju se toplinski gubici zbog potrebe za dodatnim spojnim cijevima čije je održavanje skuplje. Zbog mehaničke složenosti izvedba ne samo da je skuplja već se još stvaraju dodatni gubici. Sve to rezultira ekonomskom neisplativošću njihove uporabe.

Iako imamo neke primjere jednostavnih paraboličnih žljebastih solarnih termoelektrana s jednim toplinskim krugom tj. izravnim generiranjem pare s kolektora na parnoturbinski krug, češći slučaj je da se za radni medij obično koristi termalno ulje ukoliko se radi na temperaturama iznad 200°C zbog toga što voda na tako visokim temperaturama stvara visoki tlak u cijevima što zahtjeva jače cijevi i zglobove

čime se povećava cijena instalacije. Tako da se toplina prenosi kroz dva toplinska kruga. Prvo kroz solarni, termalnim uljem od kolektora do generatora pare gdje se toplina predaje parnoturbinskom krugu kojem je radni medij voda odnosno vodena para. Za temperature ispod 200 °C može se koristiti mješavina vode i etil-glikola ili hermetičko strujanje vode jer je tlak na tim temperaturama još podnošljiv za instalaciju. No i za termalno ulje moramo uzeti u obzir faktor maksimalne radne temperature jer iznad te temperature termalno ulje gubi postojanost tj. svojstva i ubrzo nastupa degradacija.

Karakteristična prijamna cijev kod paraboličnih žljebastih kolektora sastoji se od čelične cijevi okružene staklenom cijevi koja smanjuje konvekcijske gubitke topline isijavane s čelične cijevi radni medij zbog efekta staklenika koju takva izvedba nudi. Dok čelična cijev ima visokoapsorbirajuće i niskoemitirajuće tamne premaze koji maksimalno apsorbiraju zračenje (efekt crnog tijela). Iz slike 3.3 vidimo da se prostor između obične staklene cijevi i absorpcijske staklene cijevi s nereflektirajućim premazom ispunjava vakuumom ili, u jeftinijoj varijanti, zrakom koji stvara malo veće gubitke kod kolektora. Prijamna cijev s vakuumom koristi se pri visokim radnim temperaturama iznad 250°C jer tada daje znatno bolju efikasnost. Prijamne cijevi sa zrakom koriste se za niže temperature od 250°C jer tada toplinski gubici nisu tako kritični. Između absorpcijske cijevi i prijamne cijevi prolazi fluidni radni medij koji se zagrijava toplinskom konvekcijom s prijamne cijevi. Tako čitava obložena prijamna cijev za jedan kolektor se dobiva spajanjem većeg broja cijevi.



Sl. 3.3. Detaljan prikaz dijelova paraboličnog žljebastog kolektora [10]

Vanjska staklena cijev postavljena je na čeličnu cijev tako što je zavarena preko kompenzatora koji izjednačuje različita rastezanja cijevi pri njihovom radu. Mjesto zavara staklo-metal koji spaja staklenu cijev i kompenzator mora se zaštititi od koncentriranog sunčevog zračenja kako bi se izbjegla visoka toplinska i mehanička naprezanja koja bi mogla oštetiti cijev. [35]

Parabolični kolektori postavljaju se uglavnom s osima rotacije u smjeru sjever-jug a samo ponegdje u smjeru istok-zapad [35]. Postavljanje istok-zapad ima neujednačenije prihode sunčevog zračenja ali se kolektori mogu postavljati na ravnu ukošenu površinu prema jugu dok oni kolektori postavljeni u osi sjever-jug moraju biti postavljeni na poprilično vodoravnoj površini. U ljetnim mjesecima dobije se tri do četiri puta više dozračene energije nego zimi, ovisno o geografskom položaju i vremenskim uvjetima [35]. Zrcala koja sačinjavaju te kolektore imaju visok stupanj

refleksije (oko 88%) kako bi se čim više Sunčevog zračenja reflektiralo na prijamnu cijev. Ta zrcala su s donje strane posrebrana čime je vijek trajanja kolektora duži a stupanj refleksije zračenja veći.

U jednom uobičajenom solarnom polju parabolično žljebastih kolektora nekoliko serijski spojenih kolektora čini red, a redovi se zatim spajaju paralelno u tzv. petlju kako bi se postigla željena toplina na izlazu. Tako broj kolektora spojenih u seriju u svakom redu i broj petlji ovisi o temperaturi koja se želi dobiti na izlazu iz solarnog polja. No, mora se uzeti i u obzir da duži redovi i više petlji produciraju nešto veće gubitke jer su instalacije i put kroz cijevi duži, te se nabire gubitak od trenja i nesavršenosti toplinske izolacije. Pored toga, u svakom kolektorskom redu prijamna cijev na graničnim rubovima kolektora mora biti spojena preko fleksibilnih spojeva da bi se kolektor mogao nesmetano rotirati kako se Sunce kreće.

Neki od najčešćih u uporabi do sad su kolektori skupine modela Luz (LS) i Eurotrough (ET).

### 3.1.1. Karakteristični parametri paraboličnih žljebastih kolektora

Za izvedbu paraboličnih žljebastih kolektora važna su neki od parametara:

- geometrijski omjer koncentriranja ( $R$ ),
- kut prihvaćanja,
- rubni kut ( $\phi$ ).

Geometrijski omjer koncentriranja se dobiva omjerom između površine otvora paraboličnog kolektora koji prima izravno Sunčevo zračenje i površine plašta prijamne cijevi apsorbira koji prima koncentrirano zračenje. Dakle, računa se prema jednadžbi:

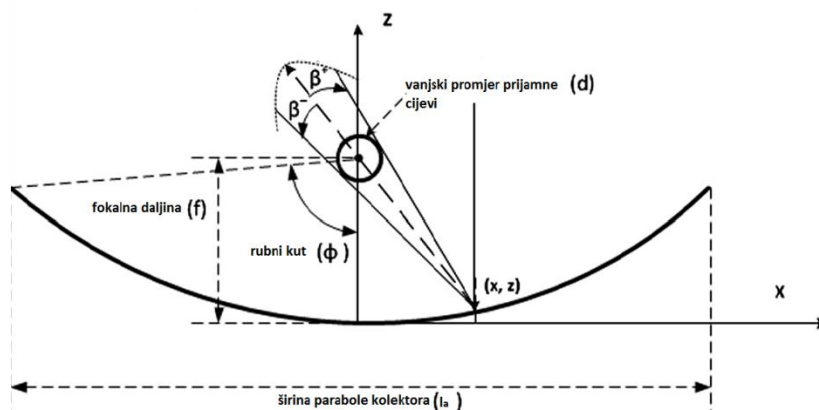
$$R = \frac{l l_a}{d \pi l} = \frac{l_a}{d \pi} \quad [35](3.1)$$

gdje je:

$d$  - vanjski promjer prijamne cijevi (m),

$l$  - duljina kolektora (m),

$l_a$  - širina parabole kolektora (m).



Sl.3.4. Parametri paraboličkog žljebastog kolektora [11]



Kut prihvaćanja je onaj maksimalni kut koji može biti formiran već s dvjema zrakama da bi nakon odbijanja od reflektora sjekle prijamnu cijev. Preporučeni kut prihvaćanja u stvarnosti iznosi između  $1^\circ$  i  $2^\circ$ .

Rubni kut ( $\Phi$ ) izravno određuje duljina luka koncentratora i njegova se vrijednost može računati iz izraza:

$$\frac{l_a}{4f} = \operatorname{tg} \frac{\Phi}{2} \quad [35] \quad (3.2)$$

Iz izraza (3.2) vidi se da je rubni kut ( $\Phi$ ) ovisio udaljenosti žarišta ili fokusa (fokalne daljine) parabole ( $f$ ) i širine parabole ( $l_a$ ). Obično taj kut iznosi između  $70^\circ$  i  $110^\circ$  [35].

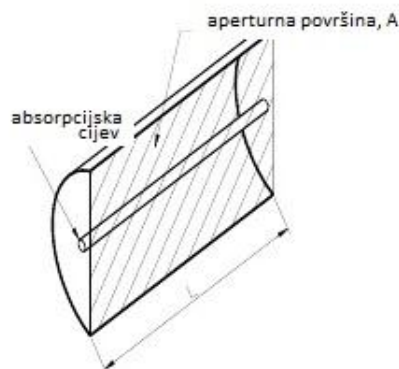
Aperturna površina kolektora ( $A$ ) također je bitan parametar kod kolektora koja je ujedno i površina ozračenosti kolektora kako bi odredili snagu izravnog sunčevog zračenja ( $P_s$ ) na kolektor pomoću izraza:

$$P_s = G_b A \quad (3.3)$$

što ujedno jednako:

$$P_s = G_b l_a l \quad (3.4)$$

gdje nam je ( $G_b$ ) izravno sunčevo zračenje iz prethodnog poglavlja.

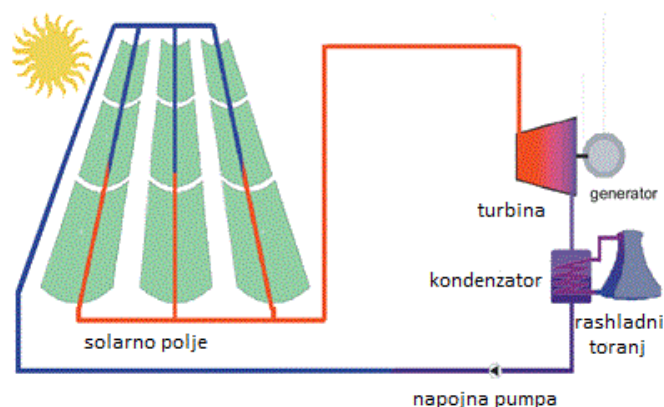


Sl.3.5. Uzdužni prikaz paraboličnog žljebastog kolektora [12]

### 3.1.2. Izvedbe solarnih termoelektrana sa spremnicima topline i paraboličnim žljebastim kolektorima

Krenimo od najjednostavnijeg oblika. To je solarna termoelektrana s paraboličnim žljebastim kolektorima koja ima samo jedan radni/prijenosni medij (para ili rastaljena sol) koji direktno sa solarnog polja opskrbljuje paroturbinski dio čiju pojednostavljenu shemu možemo vidjeti na slici 3.6.

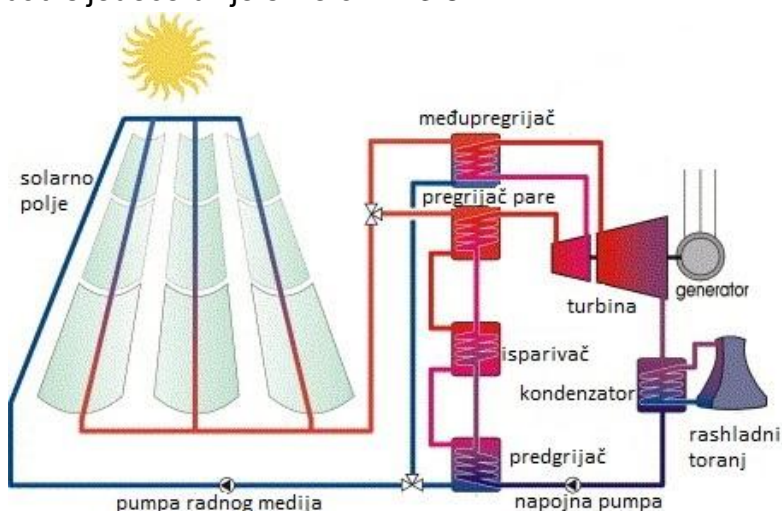




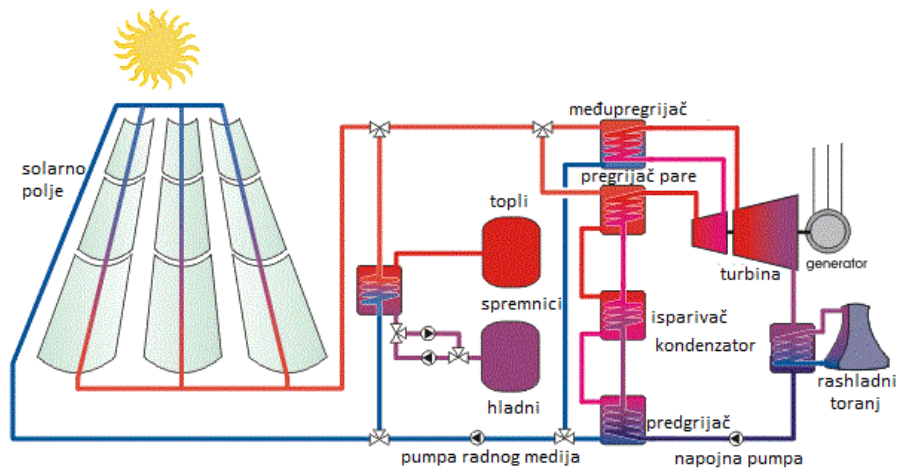
Sl.3.6. Pojednostavljena shema jednostavne nehibridne solarne termoelektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima [13]

No, uglavnom, praksa je, zbog boljeg učinka, da se takve elektrane obično izvode u **hibridnom** obliku. Tj., kao što je prethodno rečeno, postoje dva kruga: solarni i parnoturbinski. Standardizirano je korištenje termalnog ulja kao radnog medija koje se zagrijava na oko 400°C preko parabolično žljebastih kolektora. Nadalje, ulje svoju toplinu predaje vodi koja se predgrijava, isparava i pregrijava gdje u obliku pare dolazi u parnu turbinu. Kinetička energija dobivena u parnoj turbini pretvara se u mehanički rad i naposljetku u električnom generatoru u električnu energiju.

Kod **hibridne solarne termoelektrane sa spremnicima topline i paraboličnim žljebastim kolektorima** parna turbina dobiva potrebnu toplinu preko paraboličnih žljebastih kolektora ili iz već ugrijanog spremnika topline kada je Sunčevo zračenje nedostatno za rad elektrane čime se povećavaju radni sati pogona. Za usporedbu hibridne solarne termoelektrane bez i sa spremnicima topline možemo pogledati sljedeće dvije slike 3.7. i 3.8.



Sl.3.7. Pojednostavljena shema hibridne solarne termoelektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima bez spremnika topline [14]



Sl.3.8. Pojednostavljena shema hibridne solarne termoelektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima sa spremnikom topline [15]

Za spomenuti su i **hibridne solarne termoelektrane na prirodni plin i paraboličnim žljebastim kolektorima**. Ukoliko je energija iz Sunčeva zračenja nedostatna, koristi se prirodni plin kao dodatni energent za potrebno zagrijavanje radnog medija. Uključuje se pomoćni toplinski krug koji vodi radni medij kroz ložački dio gdje se radni medij dogrijava do dostatne temperature. Ovime se omogućuje kontinuirana proizvodnja električne energije kao i povećan broj radnih sati elektrane čime se ostvaruje i veće ekonomska isplativost. No, korištenje plina kao dodatnog goriva ograničeno je za takva postrojenja zakonskim državnim uredbama u većini slučajeva do maksimalno 25% potrebne toplinske energije kako elektrana ne bi u potpunosti izgubila svoju primarnu ekološku komponentu.

Ovo su samo neki od osnovnih primjera izvedbe solarne termoelektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima. Postoje još raznorazne kombinirajuće izvedbe.

### 3.1.3. Primjeri solarnih elektrana s paraboličnim žljebastim kolektorima

Prva takva elektrana komercijalne uparabe izrađena je u južnoj Kaliforniji na području pustinje Mojave. Kompleks je od 9 postrojenja instaliranih i puštanih u pogon u razdoblju od 1985. do 1991. nazvano SEGS (Solar Electric Generating System). Prvo pušteno postrojenje snage je 13,8 MW s proizvodnim troškom od 0,24 US\$/kWh. Narednim postrojenjima koja su bila izvođena sa većom nazivnom snagom od 30 odnosno 80 MW proizvodni trošak je padao gdje je za posljednje postrojenje iznosio 0,1 US\$/kWh. Iz primjera tih podataka zaključujemo da se ova tehnologija znatno razvijala u tom periodu u izvedbenim mogućnostima a i u ekonomskoj isplativosti. Na kraju ukupna dobivena snaga tog kompleksa iznosi 354MW, a ukupna površina kolektora oko 3km<sup>2</sup> što nije nezamarivo veliki prostor pa je zbog toga bilo nužno graditi je u pustinji.

Od 1998. godine i u Europska unija je počela poticati razvoj paraboličnih žljebastih kolektora, prvenstveno u Španjolskoj .

Instalacija ovakvih elektrana širi se nadalje i u sjevernu Afriku, programom

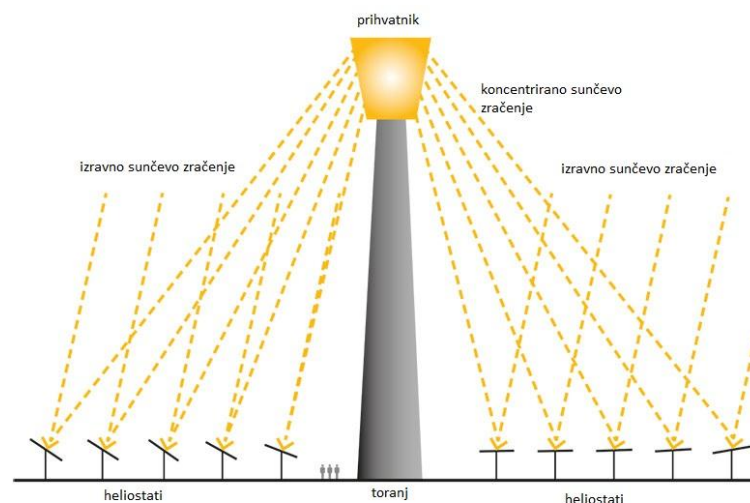
DESERTEC prvenstveno Maroko. U okolici Ourzazate-a početkom 2016. izgrađen je prvi od tri planirana kompleksa elektrane Noor. Prvi kompleks Noor 1 može raditi snagom od 150 MW dok planirani Noor 2 i Noor 3 trebaju zajedno povećati snagu kompleksa do 500 MW čime će to postati najsnažnija elektrana tog tipa na svijetu.



Sl.3.9. Solarna termoelektrana s paraboličnim žljebastim kolektorima u Maroku kod Oaurzazate-a [16]

### 3.2. Solarne termoelektrane sa središnjim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata

Ove solarne termoelektrane proizvode električnu energiju fokusirajući Sunčeve zrake na prihvatnik smješten na tornju. Kod takvog se sustava sunčevo zračenje fokusira preko polja pojedinačno smještenih ogledala koje zovemo heliostatima, u jednu točku na vrhu tornja, čime se postižu temperature i više od 1000°C. Na vrhu tornja nalazi se apsorber, koji toplinu predaje radnom mediju, a zatim radni medij prenosi toplinu do paroturbiniskog dijela elektrane. Sustav se sastoji od nekoliko stotina pa čak i tisuća heliostata koji prate kretanje Sunca i reflektiraju sunčevo zračenje na središnji prihvatnik na tornju. Prihvatnik pretvara Sunčevo zračenje u toplinu i predaje ju radnom mediju (para, zrak, natrij ili rastaljene soli natrija i kalija) čime se u parogeneratoru proizvodi para za paroturbiniski krug. Takvi su sustavi prikladni za elektrane veličine od 30 do 400 MW koje su spojene na elektroenergetski sustav [35].



Sl. 3.10. Koncept solarne termoelektrane s centralnim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata [17]

Središnji prihvatnik i heliostati su dva najbitnija dijela elektrane. Toranj može biti čelični ili betonsko čelični. Čelični se toranj koristi za lakši središnji prihvatnik (apsorber) i visinu tornja ispod 100 metara, a betonsko čelični toranj koristi se za teži središnji prihvatnik (apsorber) i visinu tornja od 100 do 250 metara. Heliostati su uređaji koji prate gibanje Sunca. Adekvatan prirodni primjer za heliostat bi bio suncokret koji prati Sunce na nebu tako da bude maksimalno izložen Sunčevoj svjetlosti. [35] Mehanički heliostati rade slično tomu s istim ciljem prikupljanja sunčevog zračenja. Heliostat je obično sastavljen od satnog mehanizma i zrcala. Satni mehanizam je programiran da prati najoptimalnije sunčevo zračenje za određeno vrijeme tako da zrcala budu adekvatno izložena zračenju kako bi se iskoristila što veća energija sunčevog zračenja. Kućište heliostata se tako okreće lijevo-desno (istok-zapad) i gore-dolje čime prati kretanje Sunca. Svaki heliostat ima okvir za zrcalo i stabilizator. Stabilizator se koristi zbog pojave vjetra koji može tresti heliostate i time ometati optimalno praćenje sunčevog zračenja.



Sl. 3.11. Jedan od heliostata u instalaciji [18]

### *3.2.1. Osnovne izvedbe solarne termoelektrane sa središnjim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata*

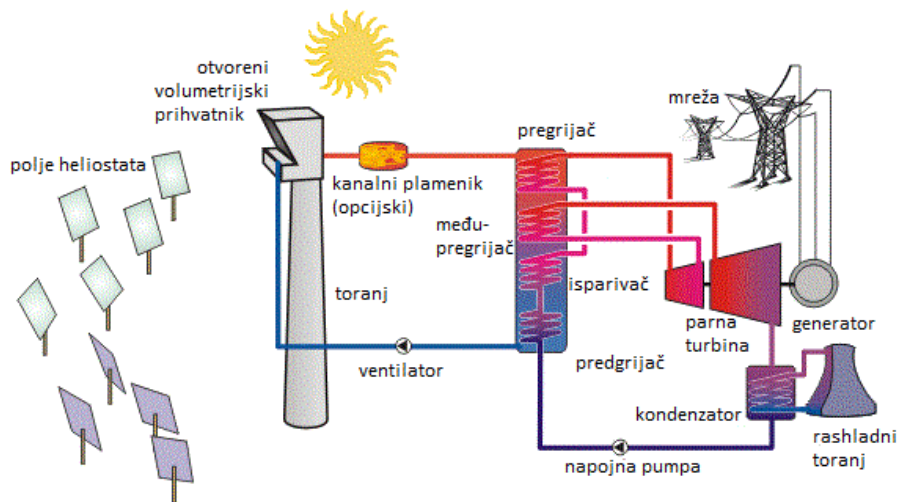
Razlikujemo dvije osnovne izvedbe kod ovih elektrana. To su:

- solarne termoelektrane s otvorenim volumetrijskim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata
- solarne termoelektrane s volumetrijskim tlačnim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata.

**Hibridna solarna termoelektrana s otvorenim volumetrijskim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata** radi na slijedeći način:

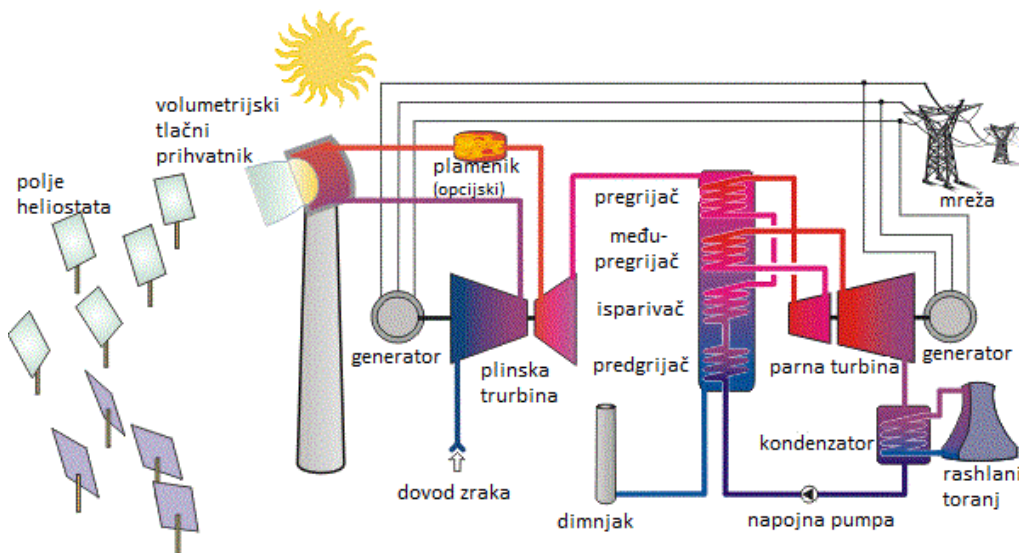
Kod otvorenog volumetrijskog prihvatnika okolišni se zrak zagrijava putem koncentriranoga Sunčeva zračenja na visoke temperature. Tako zagrijani zrak preko izmjenjivača topline generira paru, a zatim nastala para pogoni parnu turbinu s generatorom koji proizvodi električnu energiju. Zrak se može ugradnjom dopunskog plamenika u kanal dodatno zagrijavati, čime se dobiva veća raspoloživost elektrane. Njezinu pojednostavljenu shemu možemo vidjeti na slici 3.12.





Sl.3.12. Pojednostavljena shema hibridne solarne termoelektrane s otvorenim volumetrijskim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata [19]

Drugu izvedbu čini **hibridna solarne termoelektrana s plinsko-parnom turbinom i volumetrijskim tlačnim prihvatnikom na tornju s poljem heliostata**. Kod volumetrijskog tlačnog prihvatnika tlačeni se zrak zagrijava preko središnjeg prihvatnika na tornju te pogoni plinsku turbinu koja s pomoću generatora proizvodi električnu energiju. Otpadna toplina plinske turbine može se iskoristiti u procesu parne turbine i tako povećati stupanj djelovanja. I ovdje se zrak može dodatno, ugradnjom plamenika u kanal i izgaranjem nekog plina, zagrijavati, čime se ljeti dobiva veći broj radnih sati elektrane [35].



Sl.3.13. Pojednostavljena shema hibridne solarne termoelektrane s plinsko-parnom turbinom i volumetrijskim tlačnim prihvatnikom na tornju s poljem heliostata [19]

### 3.2.2. Primjeri solarnih termoelektrana sa središnjim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata

Primjer pionirske solarne termoelektrane s centralnim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata je eksperimentalna solarna elektrana Solar One u Barstowu, SAD, koja je izgrađena 1982. godine nazivne snage 10 MW. Ukupno ima 1818 heliostata pojedinačne površine 39,13 m<sup>2</sup>, što čini ukupnu površinu od 71138 m<sup>2</sup> [35].

Solarna termoelektrana s centralnim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata (Planta Solar P10) nalazi se kod Seville i prva je takvog tipa u komercijalnoj uporabi. Ukupno ima 624 heliostata, da bi se dobila nazivna snaga elektrane od 11 MW što usporedbom s pionirskom elektranom Solar One možemo zaključiti da je izvedba u smislu iskoristivosti elektrane od tada dosta napredovala. Uz nju je netom kasnije izgrađena i druga slična elektrana samo veće nazivne snage od 20 MW.

2014. u pustinji Mojave uz granicu Kalifornije i Nevade u pogon je puštena solarna termoelektrana takvog tipa nazivne snage od 392MW što je čini najsnažnijom operativnom solarnom termoelektranom na svijetu do sada. Čine je 3 jedinice odnosno tornja koje snabdjeva čak 173 500 heliostata od kojih se svaki sastoji od 2 zrcala. Koristi plinsko gorivo u slučaju nedostatka energije iz sunčeva zračenja. Okupira površinu od 1 420 ha, a ukupna neto proizvodnja električne energije za 2016. godinu iznosila je 703 039 MWh.



Sl.3.14. solarna termoelektrana Ivanpah s tri tornja s prihvatnikom i poljima heliostata [20]

Možda još značajno za dodati kako je 2016. i u JAR-u instalirana solarna termoelektrana s centralnim prihvatnikom na tornju i poljem heliostata nazivne snage 50 MW. Planiranje, izgradnja i razvijanje takvih elektrana krenulo je i u Kini, a i na još ponekim lokacijama na svijetu su u izradi takve elektrane. U najavi su dvije solarne termoelektrane s prihvatnim tornjem i heliostatima velikog poduhvata: U Nevadi i Kini (Mongolskoj pustinji) gdje će svaka od njih biti nazivne snage od čak 2 GW.



Sl. 3.13. Slika s tla i panoramska slika Solarne termoelektrane PS-10 i PS-20 kod Seville [21]

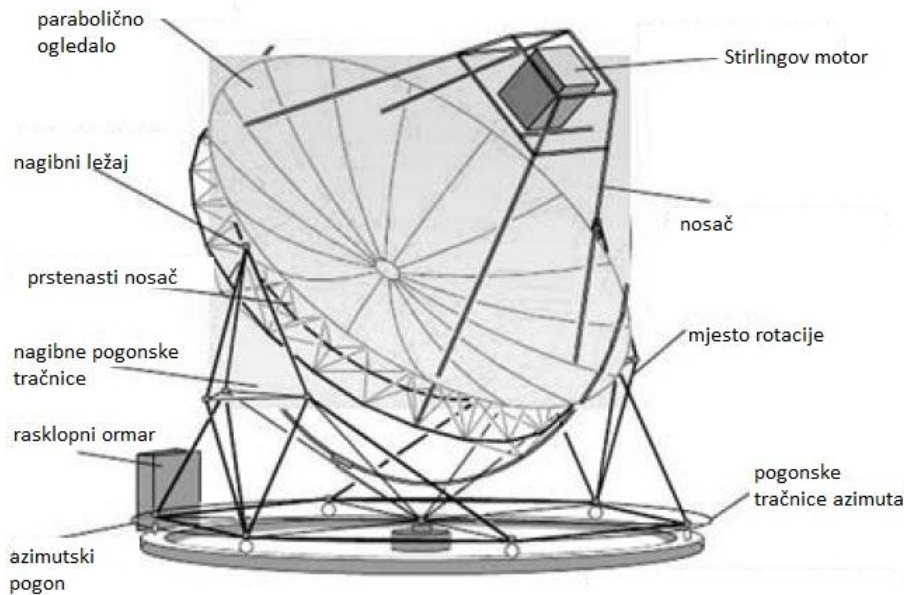
### 3.3. Solarne termoelektrane s paraboličnim tanjurastim kolektorima

Princip ove solarne termoelektrane polazi od fizikalnog efekta paraboličnog konkavnog zrcala u obliku tanjura tako da sve sunčeve zrake koje upadaju na površinu zrcala reflektiraju u jednu točku, tj. na prihvatnik u fokusu zrcala (tanjura). Uz prihvatnik je smješten i Stirlingov motor koji sunčevu energiju pretvara u mehaničku a generator koji je preko vratila izravno spojen sa Stirlingovim motorom mehaničku energiju pretvara u električnu. Time se ovakav energetski sustav koncentrirajućeg sunčevog zračenja razlikuje od ostalih solarnih termoelektrana koje rade na principu koncentriranja sunčevog zračenja jer se u biti električna energija proizvodi već na samoj jedinici tanjurastog paraboličnog kolektora čime se umanjuju gubici na toplinskom prijenosu. Takve jedinice se mogu slagati u jedan sustav ili polje povezujući proizvedenu električnu energiju električnim vodovima sa svih jedinica u jednu centralu. No, također, postoji opcija da se koncentrirana energija sunčevog zračenja s prihvatnika prenese radnim medijem do središnjeg spremnika, te se iz spremnika prenese u jedan zajednički parnoturbinski krug. Zbog fizičke izvedbe ovakvi sustavi mogu opskrbljivati samo manje potrošače električne snage do 100kW.



Sl.3.14.Koncept koncentriranja sunčevih zraka kod tanjurastog paraboličnog kolektora [22]

S obzirom na to da tanjurasti kolektori prate putanju Sunca u dvjema osima i fokusiraju Sunčevu energiju izravno u žarište zrcala, u kojem se nalazi apsorber, može se radni medij zagrijati i preko 1000°C, te tako pokretati Stirlingov motor ili parnu turbinu [35].



Sl. 3.15. Shema jedinice tanjurastog paraboličnog kolektora [23]

### 3.3.1. Primjeri solarnih termoelektrana s paraboličnim tanjurastim kolektorima



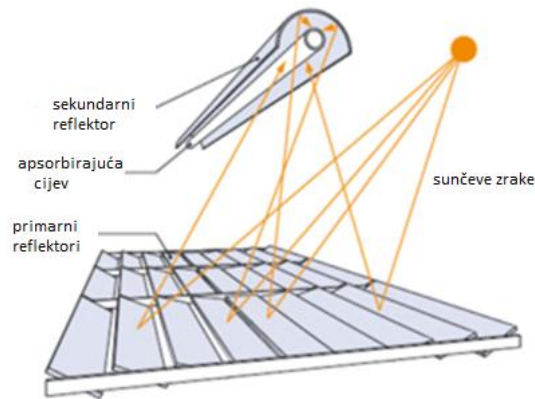
Sl.3.16. Primjer postrojenja parabolično tanjurastih kolektora [24]

Demonstracijski pogon Advanco Corporation of Beverly Hills, SAD, ostvario je pretvorbu Sunčeve energije u električnu sa stupnjem djelovanja od 31,6% čime je pokazana i najbolja djelotvornost pretvorbe Sunčeve energije u električnu u usporedbi s ostalim solarnim tehnologijama. Također, Australija je primjer zemlje koja se usredotočuje na instalacije mnogih solarnih termoelektrana s paraboličnim tanjurastim kolektorom te se trenutno radi na smanjivanju troškova ovakvih sustava kroz povećanje serijske proizvodnje.



### 3.4. Solarne termoelektrane s Fresnelovim reflektorima

Fresnelovi kolektori su linearni koncentrirajući sustavi s prihvatnikom. Za razliku od paraboličnih kolektora oni ne prate hod sunčevog zračenja. Umjesto toga, primarna zrcala (reflektori) od kojih se sastoji i koja se nalaze najbliže tlu se naginju u smjeru sjever-jug tako da se zračenje najoptimalnije usmjerava ka sekundarnom reflektoru koji skreće zrake konačno na apsorbirajuću cijev što možemo vidjeti na slici 3.17..



Sl. 3.17. Princip djelovanja Fresnelovih kolektora [25]

Mogli bi reći da je to neki oblik kombinacije solarnih paraboličnih žljebastih kolektora i koncentriranja sunčevog zračenja s prihvatnikom i heliostatima. Ovisno o dizajnu, primarna zrcala su ravna ili lagano zaobljena i paralelno postavljena naspram prihvatnika. Prihvatnik je apsorbirajuća cijev koja je praktički jednako izrađena kao i apsorbirajuća cijev kod paraboličnih žljebastih kolektora te je smještena na fokalnu daljinu sekundarnog reflektora. Dok je sekundarni reflektor smješten iznad i uzduž apsorbirajuće cijevi kao što možemo i vidjeti na slici 3.17. Daljni prijenos topline i princip rada elektrane su identični solarnim termoelektranama s paraboličnim žljebastim kolektorima.



Sl. 3.18. Fresnelovi kolektori integrirani u sustav elektrane [26]

Fresnelovi kolektori su jeftiniji za izvesti od parabolično žljebastih kolektora te se mogu lakše održavati zbog manje mehaničke kompleksnosti. No, samim time efikasnost im je za 30% manja od parabolično žljebastih kolektora ako uspoređujemo kolektore istih veličina. Veći gubici zbog sjenki u jutarnjim i večernjim satima čine veliku neujednačenost u snazi rada elektrane tijekom sunčanog perioda dana. Stoga,

izvedba ovakve elektrane ne bi smjela prelaziti 70% troškova solarne termoelektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima iste nazivne snage kako bi bila konkurentna.

Do nedavno su ovakve elektrane bile samo u razvojnoj fazi, no 2012. otvorena je prva solarna termoelektrana s Fresnelovim kolektorima za komercijalnu upotrebu Puerto Errado u španjolskoj regiji Murcia nazivne snage oko 30 MW.

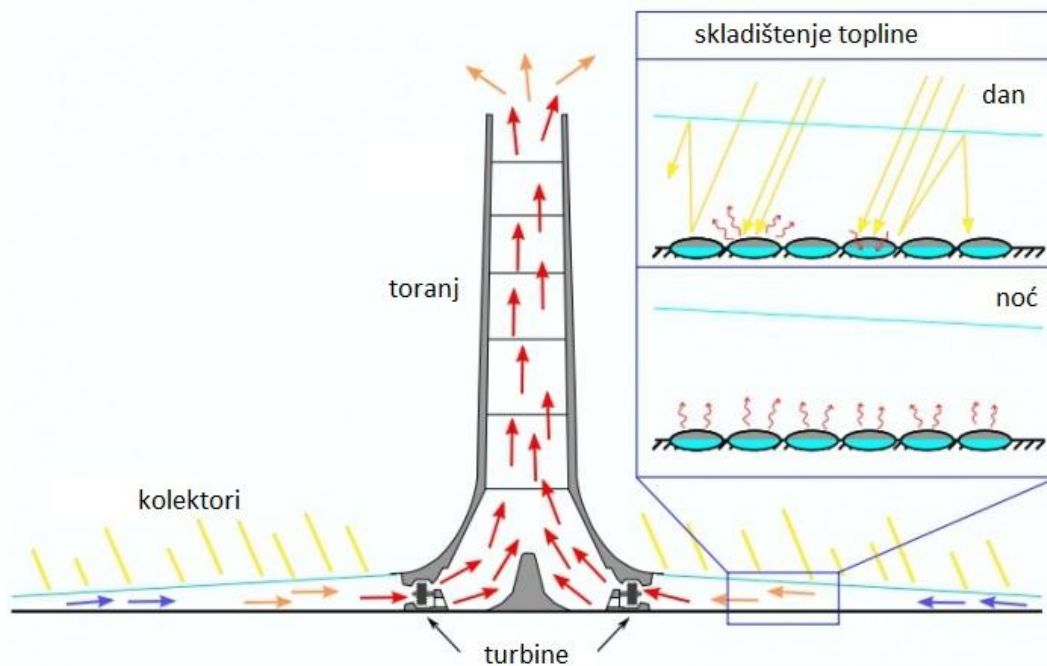


Sl.3.19. Solarna termoelektrana s Fresnelovim linearnim lećama Puerto Errado [27]

### 3.5. Solarne dimnjačne elektrane

Solarna dimnjačna ili uzgonska elektrana ostvaruje svoj učinak pomoću efekta staklenika i toplinskog uzgona. Sastoji se od velike apsorbirajuće površine pokrivena pokrovom tj. prozirnim materijalom kao što je polivinil-fluorid ili staklo koji služi kao kolektor topline čineći jedan veliki "staklenik". Energija sunčevog zračenja zagrijava unutrašnji apsorbirajući prostor uz pomoć efekta staklenika. Što znači da se dio energije sunčevog zračenja koje se reflektira i emitira s površine tla opet dijelom reflektira od pokrova nazad prema unutrašnjosti "staklenika" čime dodatno zagrijava taj prostor na oko 35°C višu temperaturu od okoline. Pokrov staklenika postavljen je pod malim nagibom prema sredini sustava gdje je smješten visoki dimnjak. Topli zrak struji prema sredini, gdje se nalazi dimnjak. Zbog toplinskog uzgona, jer je zrak vani hladniji a unutarnji topliji zrak lakši, topliji se zrak iz staklenika uzdiže kroz dimnjak iznad hladnijeg vanjskog zraka. Tako se razvija dostatno zračno strujanje potrebno za pokretanje vjetroturbine i generatora.

Kako bi se strujanje zraka što više iskoristilo poželjno ga je koncentrirati što je moguće niže pri tlu gdje se mogu smjestiti zračne turbine. To se postiže ugradnjom (posebnom tehničkom izvedbom) dimnjaka koji na svojem dnu formira podtlak koji je potreban za rad turbine. Prostor ispod velike površine kolektora, odnosno, u ovom slučaju „staklenika“, ima ulogu akumulacije energije kao što kod hidroelektrana ima umjetno jezero na višoj razini (gravitacijska energija), samo što je u tom slučaju medij voda a ne zrak.



Sl. 3.20. Načelo rada solarne dimnjačne elektrane [28]

Zagrijani zrak pred ulazom u dimnjak ima određenu radnu sposobnost, tj. eksergiju, koja se samo jednim dijelom troši na koristan rad odnosno na pokretanje turbine, dok većim dijelom na podizanje i dalje lakšeg zraka iza dimnjaka [35]. Način konstrukcije omogućava korištenje izravnog i raspršenog Sunčevog zračenja. I ukoliko se ostvaruje što veća razlika temperatura unutrašnjeg i vanjskog zraka time ćemo će se povećati i brzina odnosno protok zraka. Površina ispod stakla služi kao spremnik topline jer tada prozirni pokrov staklenika djelomice služi kao toplinski izolator pa se rad elektrane može produžiti i nekoliko sati nakon zalaska Sunca, no sa smanjenim kapacitetom, ovisno o količini akumulirane energije u tlu unutar "staklenika" ali i u samom materijalu pokrova.

Ukupna učinkovitost solarne dimnjačne elektrane iznimno je niska i kreće se od 0,5 do 1,3% [35]. Iskoristivost raste s visinom dimnjaka i tu se nailazi na građevinski problem jer visina dimnjaka iznad 1500m [35] predstavlja nepremostive tehničke ali i ekonomske prepreke. No, velika je prednost u tome što je pogonski energent apsolutno besplatna sunčeva energija, te elektrani ne treba puno dodatnih instalacija i uređaja koji bi izazivali gubitke. Nema nikakvog štetnog utjecaja na okoliš za razliku od nekih koncentrirajućih solarnih sustava koji mogu ostaviti manje posljedice na ekološki sustav. A može se graditi i na poljoprivrednim terenima čiji „staklenici“ služe za uzgoj poljoprivrednih kultura..

Ideja za takvu elektranu predstavljena je već davne 1901. u španjolskom časopisu "La Energia electrica". Dok je koncept solarne dimnjačne elektrane razvio profesor Jörg Schlaich s Instituta za konstrukciju i dizajn Sveučilišta u Stuttgart-u. Izgradnja prvog prototipnog postrojenja u Manzanaresu u Španjolskoj započela je 1980. godine, a dovršena 1985., nakon čega su provedena ispitivanja radnih karakteristika do 1990. godine. Izvedba te elektrane opisana je u narednom odjeljku kao primjer solarne dimnjačne elektrane.



Sl. 3.21. Solarna dimnjačna termoelektrana u Manzanaresu [29]

Kolektorski krov kombinirane je izvedbe od stakla i posebne plastične folije. Površina prekrivena plastičnom folijom iznosi 40 000 m<sup>2</sup>, a staklom 6000 m<sup>2</sup>. Ukupni troškovi gradnje prototipa iznosili su nešto manje od milijun američki dolara. Visina dimnjaka iznosi 194,6m, a promjer 10,2m. Promjer kolektorskog pokrova je 244m. Nazivna snaga iznosi 50kW s četiri turbinska agregata. Tijekom probnog rada ispitani su različiti profili turbinskih lopatica i načini smještaja turbinskih agregata. Pri brzini od 2,5m/s turbine su započinjale rad, sve do maksimalno predviđene brzine od 12m/s. Za vrijeme probnog rada uočeno je da su postrojenja vrlo stabilna u pogledu kolebanja napona zbog čega su daleko povoljnija od vjetroturbina. Kod takvih se postrojenja stabilizacija mreže provesti bez većih zahvata. [35]



Sl.3.22. Plantaža ispod kolektora elektrane koji služe kao staklenici [30]

Zasad, uvijet za izgradnju ovakvih elektrana je područje s približno 2000 kWh po kvadratnom metru. Od ukupno raspoložive svjetske površine s pogodnom insolacijom najviše zauzimaju nerazvijene zemlje. Upravo se komercijalizacijom postrojenja solarnih dimnjačnih elektrana može pomoći tim nerazvijenim zemljama. S tom vrstom elektrana pokrenule bi se i plantaže koje se mogu usputno održavati ispod kolektora elektrane što ne samo da ne bi time oduzimali prostor poljoprivrednom zemljištu već bi i pripomogli u poljoprivrednom razvoju. Za napomenuti je da je u Arizoni u procesu izrade najveća elektrana tog tip koju će pogoniti turbine od 200MW.



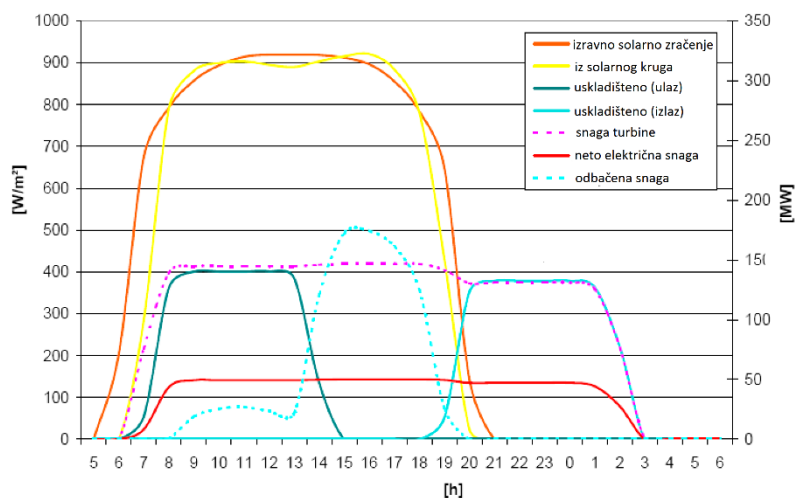
### 3.6. Solarno jezero-elektrana

Solarno jezero je u biti otvoreni spremnik slane vode s tamnim dnom. Umjetno se izaziva pojava termoklina. Voda se, naime, zbog različite slanoće u slojevima ne miješa iz jednog temperaturnog dubinskog sloja u drugi što izaziva velike temperaturne razlike između slojeva a i postojanost temperaturno različitih slojeva. Voda iz jezera je podjeljena u tri sloja. Gornji sloj hladne vode i niske slanoće izložen je atmosferskim utjecajima, srednji sloj s gradijentom slanoće i donji topli sloj visoke slanoće, čija debljina definira toplinski kapacitet elektrane jer je u izravnom doticaju s tamnim dnom koje se zagrijava jer apsorbira sunčevo zračenje zbog efekta crnog tijela. Iako se očekuje da se toplija voda iz donjeg sloja podigne u gornji zbog toplinskog uzgona, zbog veće koncentracije soli voda iz donjeg dijela je teža i ne može prijeći u gornji. Isto tako, lakša hladna voda iz gornjeg sloja ne može prijeći u donji sloj.

Voda se, zatim, iz vrućeg donjeg sloja može crpiti u sustave za proizvodnju pare u parnoturbinskom krugu. Zbog male temperature vode (ispod 100°C), termodinamička djelotvornost pretvorbe iznosi do 8%, a ukupna djelotvornost pretvorbe Sunčeve energije u električnu 0,5% [35]. Baš zbog toga primjerci ovakve elektrane su rijetki i još uvijek su u razvojnoj fazi te se obično mogu izvoditi samo na sušnim i vrućim dijelovima Zemlje.

## 4. Uskladištenje solarne energije

Kod svih solarnih elektrana općenito je problem što rad elektrane ovisi o postojanju sunčevog zračenja a energiju treba distribuirati po želji potrošača što se uvijek ne podudara sa trenutnom količinom sunčeva zračenja, posebice noću, kada tog zračenja niti nema. Stoga, kako bi se što više smanjio udio korištenja konvencionalnog goriva u ispomoći rada takvih elektrana, pa čak kako bi se takve elektrane potpuno oslobodile pomoćnog konvencionalnog goriva, utvrđuju se raznorazne metode skladištenja energije, mahom u obliku topline.



Sl. 4.1. Grafički prikaz odnosa raspodjela snage kod solarne termoelektrane tokom jednodnevnog perioda [31]

Najjednostavnije izvedene solarne termoelektrane su one s **direktnim generatorom pare**. Što znači da se para stvara već u samom solarnom polju i kao takva se koristi kao jedini prijenosni medij topline ali i kao medij za spremanje topline. Ovakvi sustavi za spremanje topline koriste se za ravnotežu između potražnje i proizvodnje pare u procesu rada elektrane. Za to se koriste akumulatori pare koji omogućuju zasićenu vodenu paru pri tlaku do 100 bara. Vrlo dobro iskorištavaju visoki volumski kapacitet pohrane topline tekuće vode u iznosu do 1,2 kWh/m<sup>3</sup>. U tlačnim posudama direktna pohrana zasićene i pregrijane pare nije ekonomična zbog niske volumske energetske gustoće. Nasuprot tome, akumulatori pare koriste osjetnu toplinsku pohranu u visokotlačnoj zasićenoj tekućoj vodi koja se nalazi u takvim akumulatorima. Prednost ovakvog načina korištenju toplinskog medija i ovakve pohrane topline je u tome što daje apsolutnu neovisnost od fosilnih goriva kao dodatni izvor topline, a uz to eliminira dodatne izmjenjivače topline koji su potrebni kod više toplinskih krugova različitih toplinskih medija na čemu se ujedno i gubi dio topline. Također omogućuje rad solarnog polja na višim temperaturama rezultirajući višu snagu toplinskog kruga, tj. veću protočnost fluida s manjim gubitcima zbog crpnih sistema.

Drugi način je **direktno pohranjivanje pare**. Sa solarnim krugom spajaju se tankovi (moduli) u koje se sprema zagrijana voda koja kao takva služi kao medij kojim se sprema toplina. Ovakav tip elektrane ima pretvorbu solarne energije u električnu oko 17,5% a efikasnost spremanja topline kroz takve tankove iznosi oko 92%.

Treći način pohranjivanja topline se može ostvariti pomoću **dva tanka mineralnog ulja** koje služi kao medij za pohranjivanje topline a ujedno i medij za prijenos topline. Ulje se sprema u dva različita tanka gdje se u jednom sprema toplije ulje od oko 307°C koje je neposredno prije toga bilo zagrijano od strane solarnog polja a u drugi hladnije od oko 240°C kako bi se regulirala željena temperatura a time i snaga toplinskog kruga. Problem ovakvog pohranjivanja topline je u tome što ovo ulje koje se koristi kao medij ima visok tlak pri isparavanju te se ne može koristiti u velikim nestlačenim tankovima ako želimo da pogon radi na višim temperaturama. Tankovi pod tlakom su vrlo skupi za izvedbu a i ne proizvode se u većim zapreminama. Nadalje, potrebne su velike količine ulja što povećava trošak instalacija. Prednost je u tome što se koristi isti medij za prijenos i pohranjivanje topline tako da se na toj vrsti separacijske instalacije štedi.

Četvrti način pohranjivanja topline može se ostvariti pomoću jednog vrućeg i hladnog tanka gdje nam kao medij za pohranjivanje topline služi **rastaljena sol**. U hladnom tanku drži se toplija sol koja može imati temperaturu i do 600°C dok se u hladnijem tanku drži sol na oko 290°C čime se regulira snaga elektrane. Ovakvo pohranjivanje topline dobilo je prednost prema pohranjivanju topline s mineralnim uljima jer omogućuje rad na višim temperaturama a da struktura materijala i njegova glavna svojstva ostaju nepromijenjena. Nadalje, taj način spremanja topline

funkcionira pri niskom tlaku para, soli posjeduju umjerenu specifičnu toplinu, nisku kemijsku reaktivnost te je zbog svega toga trošak izvedbe znatno smanjen. Upotrebljavaju se različite soli i u različitim komponentama i omjerima ovisno o željenim optimalnim zahtjevima. Te komponente soli mogu biti fluoridi, kloridi, nitrati i karbonati alkalijskih metala: natrija, kalija i litija; iako se mogu naći i soli s elementima kalcija, magnezija pa čak i barijem i stroncijem. Ova metoda spremanja topline ima veliku vrlo visoku učinkovitost što je rezultiralo da se i najviše primjenjuje kao način pohranjivanja topline u solarnim termoelektranama. Ovakvo pohranjivanje topline može se izvesti direktno tj. da sol bude istodobno medij za pohranjivanje ali i za prijenos topline, te indirektno što znači da nam je ta sol samo medij za pohranjivanje topline a za prijenos topline služi ili mineralno ulje ili para.



Sl. 4.2. Hladni i vrući tank rastaljene soli integriran u solarnu termoelektranu s paraboličnim žljebastim kolektorima [32]

Skladištenje energije pomoću **latentne topline** je još jedan način kako regulirati rad elektrane za potražnjom električne energije. Toplina dovedena nekom materijalu uzrokuje povećanje njegove unutrašnje energije i osim što se time povećava njegova temperatura, može mu se mijenjati agregatno stanje (latentno zagrijavanje). Akumulacija sunčeve energije pomoću latentne topline koristi toplinu taljenja odgovarajućeg kemijskog spoja. Materijal u spremniku pod utjecajem dovedene topline prelazi iz čvrstog u kapljevitost na određenoj temperaturi, koja je za čiste tvari konstantna i odgovara talištu. Kod nekih tvari toplina se uskladišćuje kao toplina kristalizacije. Te tvari dovođenjem topline prelaze iz jedne čvrste faze u drugu, a oduzimanjem topline vraćaju se u početnu fazu. Spremnici koji koriste latentnu toplinu rade u temperaturnom području oko tališta, tako da je početna temperatura nešto ispod tališta, a konačna temperatura nešto iznad tališta tvari. [57] Tako se dovođenjem energije u spremnike temperatura znatno ne podiže već se samo tali medij za pohranjivanje topline. U praksi je to sol, najčešće Glauberova sol ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10 \text{H}_2\text{O}$ ) koja se tali pri  $30^\circ\text{C}$ .

Kod skladištenja energije latentnom toplinom u praksi je djelotvornost veća ako se to izvodi kroz **kaskade**. Koristi se više modula napunjenih solju u kojem svaki modul ima svoju koncentraciju rastaljene i skrućene soli, tj. medija za pohranjivanje topline u vremenu rada elektrane. Primjerice, u početnom modulu koji se nalazi na jednom kraju gdje se kaskada puni toplinom, sol je rastaljena u udjelu od oko 90%, dok je na drugom kraju kaskade modul koji se nalazi kod izlaza toplinskog pražnjenja i koji sadrži 67% udjela krute soli. Ovakav način korištenja latentne topline u skladištenju energije omogućuje veću iskoristivost kod faznih prijelaza i više

ujednačene izlazne temperature u jedinici vremena. Prednosti kaskadnog skladištenja energije pomoću latentne topline u odnosu na dva tanka (vrući i hladni) su sljedeći:

- koristi se manja količina soli za jednaku količinu uskladištene topline,
- ne trebaju se instalirati dodatne pumpe i ostali uređaji za regulaciju topline koje se kod skladištenja s dva tanka koriste kako bi sol bila u tekućoj fazi.

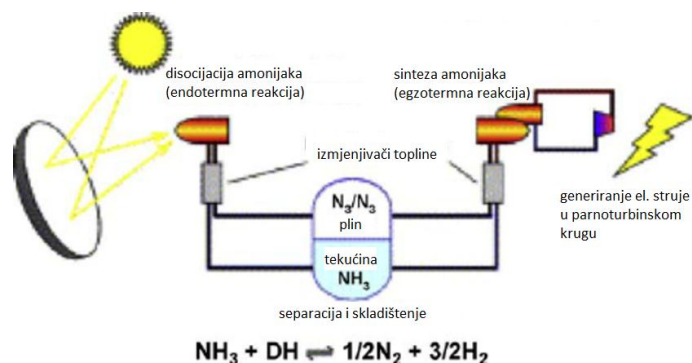
Nedostaci u odnosu na skladištenje s dva tanka:

- potreban je izmjenjivač topline zbog neujednačene izlazne temperature medija za prijenos topline
- trošak izvedbe je veći zbog kompleksnosti sustava odnosno instaliranja većeg broja tankova tj. modula te veće količine medija za prijenos topline.

U nekim elektranama služe se **pasivnim skladištenjem topline** za što se koristi kruti medij u oblaganju cijevi s toplinskim medijom. Kruti mediji imaju visoki toplinski kapacitet što smanjuje volumen pohranjenog toplinskog medija, dok visoka toplinska provodnost povećava dinamiku sustava. Odgovarajući koeficijent toplinske ekspanzije, postojanost i niski troškovi izvedbe uvjetovali su da se za to ponajprije koristi beton. U opticaj je još ušla i lijevana keramika kao materijal koji bi mogao zamijeniti ili nadopuniti korištenje betona u te svrhe. Jer takav materijal posjeduje 20% veći toplinski kapacitet i puno veću toplinsku vodljivost od betona. No, taj materijal je još uvijek dosta skuplji od betona iako ima potencijal da mu se izvedbena cijena smanji. Nadalje, beton je čvršći i lakše se ugrađuje u sustav elektrane te znakova degradacije između cijevi toplinskog medija i betona nema.

U nekim elektranama izveli su **hibridno skladištenje energije** tj. skladištenje energije pomoću kaskadnog skladištenja latentnom toplinom u kombinaciji s pasivnim skladištenjem uz pomoć betona. Time se htjela postići bolja efikasnost budući se dobiva kombinacija dobre toplinske vodljivosti i cijene betona sa dobrom karakteristikom skladištenja energije od strane rastaljene soli.

U začecima je **kemijski način skladištenja energije**. Koncept je taj da reaktanti u fiksnoj zalihi prolaze naizmjenično između reaktora za pohranjivanje energije i reaktora za ispuštanje energije s odredbom skladištenja reaktanata na temperaturi okoline između reaktora. To je u principu Haber-Bosch-ov postupak. Postupak je prikazan na slici 4.3. Ovakav način skladištenja energije prigodan je kod postrojenja s paraboličnim tanjurastim kolektorima.



Sl. 4.3. Koncept kemijskog skladištenja energije [33]



Prednosti ovog sustava skladištenja energije su da nepoželjne nuspojave nisu moguće, čineći solarne reaktore laganim za upravljanje. Endotermna reakcija se odvija na temperaturi solarnih koncentratora. Omogućena je automatska fazna separacije amonijaka i vodika-dušika tj. sinteza amonijaka koja se vrši uz prisustvo katalizatora. A može se koristiti uobičajeni tank za skladištenje.

Inovativni pristupi skladištenju energije:

**Koncept pokretljivog (fluidiziranog) sloja** je primjenjiv u solarnim termoelektranama sa središnjim prihvatnikom na tornju i heliostatima. Sastoji se u tome da je izmjenjivač topline zrak/pijesak instaliran u prihvatni toranj da bi se smanjili gubici. Pijesak je fluidiziran u izmjenjivaču, u namjeri da zrak prolazi kroz nj. Zrak dostiže vrlo visoku temperaturu u prihvatnom tornju, što znači poboljšanje efikasnosti i stupanj skladištenja energije elektrane.

**Koncept pokretljivog zida** je predložen s namjerom da se koncept od dva tanka (hladni i vrući) reducira na jedan i time smanje troškovi instalacije. K tome se smanjuju toplinski gubici činjenicom da je hladni i vrući volumen rastaljene soli razdvojen samo unutarnjim pokretljivim zidom kojim se regulira odnos volumena vrućeg i hladnog medija u tanku.

## 5. Utjecaj solarnih termoelektrana na okoliš

Gradnja ovakvih elektrana karakterizira bitno veći (više nego za jedan red veličine) utrošak materijala i radne snage po jedinici instalirane snage nego što iziskuje gradnja nuklearnih i termoelektrana. Stoga, takav povećani utrošak materijala kao i utrošena snaga u proizvodnji potrebnih dijelova za instalaciju elektrane imaju određeni dodatni indirektni utjecaj na okoliš. [46]

Daljnji utjecaj na okoliš kod ovih postrojenja je vezan uz znatnu zauzetost terena za gradnju terena i pogon kao što smo vidjeli iz navedenih primjera iz prethodnih poglavlja.

Sunčeva elektrana u pogonu malo utječe na zdravlje okolnog stanovništva. Jedini se utjecaj može pripisati mogućem oštećenju vida zbog intenzivnog reflektiranog zračenja [46], i utjecaja kemikalija u prijenosnom fluidu kod sustava s centralnim tornjem. Zabilježeni su i neki slučajevi stradavanja ptica koje su se našli u polju centralnog prihvatnika s heliostatima, posebice u slučaju najveće takvog tipa, elektrane Ivanpah. Problem se pokušava riješiti dalekosežnom akustičnom napravom i radarom za ptice čime se koriste i u zračnom prometu kako bi se omele i skrenule ptice s tog područja. Nadalje, postoji rizik i od izljevanja radnog medija ukoliko je taj radni medij termičko ulje koje može ostaviti teže posljedice po bližoj okolini.

## 6. Usporedba solarnih termoelektrana s ostalim elektranama

Solarne termoelektrane, prvenstveno one iz skupine sustava koncentrirajućeg zračenja su trenutno jedina opcija s kojom se razmatra mogućnost zamjene klasičnih termoelektrana u budućnosti jer su jedine iz područja obnovljivih izvora energije kojim se može proizvoditi energija veće potražnje a da to bude donekle praktično, tehnički izvedivo i ekološki prihvatljivo, ne uspoređujući ih samo s konvencionalnim elektranama (s fosilnim gorivima i nuklearnim elektranama) već i s fotonaponskim sustavima te vjetroelektranama i hidroelektranama. Solarne termoelektrane, uzimajući u obzir njihovu izravnu i posrednu posljednicu samog rada a i svaku djelatnost u njezinoj instalaciji i održavanju, najbolje zadovoljavaju Protokol iz Kyota jer za istu količinu proizvedene energije generiraju najmanji udio emisija ugljikova dioksida (CO<sub>2</sub>) te su vrlo povoljne za zadovoljavanje smanjenja ostalih štetnih plinova kao što su SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>.

Solarne termoelektrane koriste najveći energetske potencijal na Zemlji koji je neiscrpan, obnovljiv, svugdje lako prisutan, ne treba ga uvoziti niti izvoziti. Dok s druge strane, način rada elektrane je uvelike sličan klasičnim termoelektranama gdje se koriste termodinamički procesi kako bi se došlo do željenog rezultata i otvara razne mogućnosti integracije i hibridizacije pogona s pogonima konvencionalnih termoelektrana. A to je ujedno i razlog zašto jedino takve elektrane mogu biti konkurentne u količini proizvodnje električne energije s ostalim termoelektranama i hidroelektranama. No, isto tako, nažalost, ne možemo očekivati pravu konkurentnost dok je ponajprije cijena uloženog konvencionalnog goriva po proizvedenom kWh znatno niža od cijene proizvedenog kWh u solarnoj termoelektrani. Predviđanja su da bi u razdoblju do 2050. godine cijena kWh dobivenog iz najučinkovitijih koncentrirajućih solarnih termoelektrana trebala doseći cijenu kWh dobivenog iz vjetroelektrana i hidroelektrana i biti čak niža od cijene dobivenog kWh iz ugljena i nafte ili plina. Zasad je cijena dobivenog kWh iz tih najučinkovitijih koncentrirajućih solarnih termoelektrana niža od kWh dobivenih iz fotonaponskih sustava iako se i kod njih zapaža još značajniji pad u cijeni izvedbe postrojenja.

Osim nekih manjih negativnih ekoloških utjecaja na faunu okoliša koje smo spomenuli u prethodnom poglavlju javlja se problem tehničke izvedivosti i velikog financijskog potraživanja u izgradnji koji pred građevinsku struku predstavlja izazov. A uz to, posebno kod skupine sustava koncentrirajućeg zračenja, pojavljuje se i problem smještaja tj. zauzimanja velikih površina prostora. Problem je vezan i uz transport energije budući da energiju treba dovoditi iz insolacijskih krajeva u daleke krajeve puno manje insolacije (primjer sjeverna Afrika - središnja Europa).

Kao i kod svih solarnih elektrana i solarne termoelektrane nisu imune na neujednačenost željene opskrbe u jedinici vremena zbog variranja sunčeva zračenja tokom vremenskog perioda pa se zbog toga moraju ulagati dodatna sredstva i naponi za uskladištenje regulaciju protoka energije.

U tablici 6.1. prikazano je razdoblje povrata utrošene energije za proizvodnju, pogon i razgradnju (recikliranje) elektrane u okoliš. Vidi se da solarna termoelektrana za 5 mjeseci povratu svu utrošenu energiju na to što je najkraće vrijeme u odnosu na druge elektrane u proizvodnji energije. Termoelektrana na plin ili ugljen također sadrži energetske i novčani ulog (input): za izgradnju postrojenja, sam rad elektrane, konstantnu dobavu goriva i izdavanje penala za stakleničke plinove, što je u konačnici neusporedivo s obnovljivim izvorima energije. [35]

Vjetroelektrana	4-7 mjeseci
Hidroelektrana	9-13 mjeseci
Solarna termoelektrana	5 mjeseci
Fotonaponski sustav	1-4 godine
Termoelektrana na plin	Nije analizirano
Termoelektrana na ugljen	Nije analizirano
Nuklearna elektrana	Nije analizirano

Tablica 6.1. Razdoblje povrata uskladištene energije za proizvodnju, pogon i razgradnju elektrane u okoliš [35]

Ako uspoređujemo općenito solarne termoelektrane s ostalim solarnim sustavima dolazimo do zaključka sustav običnih ravnih solarnih kolektora koji može poslužiti samo za grijanje vode kućanstva ne može proizvoditi električnu struju snage reda stotina megavata kao što to mogu brojne solarne termoelektrane. Fotonaponski sustavi su, doduše konkurentniji što se toga tiče, pogotovo u zadnje vrijeme gdje je nekoliko fotonaponskih sustava izgrađeno (mahom u području jugozapadnog SAD-a) razvijajući snage i po nekoliko stotina MW. iskoristivost tih sustava je veća jer se solarna energija direktno pretvara u električnu, te se mogu graditi i u području manjih insolacija ali za manje energetske potrebe. Mane fotonaponskih sustava u odnosu na solarne termoelektrane su ti osim što je vidljivo iz tablice 6.1. da su za njih potrebni veći ulozi sa isti red veličine koji se kasnije amortiziraju, činjenica je i da kemijska razgradnja fotoćelija ostavlja štetan utjecaj na okoliš a i u proizvodnji takvih sustava proizvodi nešto više štetnih tvari kao što je ugljični dioksid.

Ako uspoređujemo međusobno neke solarne termoelektrane onda moramo reći da je zasad daleko najbolja iskoristivost solarne termoelektrane s paraboličnim žljebastim kolektorima koja iznosi i do 30% zbog manjih instalacija i gubitaka u parnoturbinskom dijelu. No, takve elektrane se koriste tek za manje količine potrošnje i njihovi troškovi po proizvedenom kWh su najveći (2-3 puta veći od ostalih solarnih termoelektrana), iako pokazuju veliku tendenciju pada u odnosu na ostale solarne termoelektrane. Negdje podjednaku iskoristivost od 11-13% imaju solarne termoelektrane s paraboličnim žljebastim zrcalima i one s prihvatnikom na tornju i heliostatima iako su zasad one s paraboličnim žljebastim zrcalima još uvijek nešto malo isplativije od onih s prihvatnikom na tornju i heliostatima. Dimnjačne (uzgonske) solarne termoelektrane imaju vrlo malu iskoristivost od 1% i ne mogu razvijati visoku nazivnu snagu kao one sa paraboličnim žljebastim kolektorima i one s prihvatnikom na tornju i heliostatima, ali njihov adut je u vrlo visokom opadanju troškova proizvodnje energije jer se dijelom troškovi dobivanja te energije trebaju povratiti kroz popratnu poljoprivrednu djelatnost koju takve elektrane nude ispod staklenika. Ti troškovi proizvedenog kWh bi već uskoro trebali iznositi manje od kWh proizvedenog u ostalim solarnim termoelektranama.

Iz tablice 6.2. možemo vidjeti neke brojčane vrijednosti koncentrirajućih solarnih termoelektrana za usporedbu pod napomenom da su se te brojke nešto izmijenile u ovih destak godina od kad je uzeta usporedba.

Parametri sustava	Solarne termoelektre s paraboličnim žljebastim kolektorima	Solarne termoelektre s prihvatnikom na tornju i poljem heliostata	Solarne termoelektre s paraboličnim tanjurastim kolektorima
Omjer koncentriranja (R)	<b>40-100</b>	<b>400-1000</b>	<b>200-1000</b>
Površina kolektora u m <sup>2</sup> /kW	<b>15-8</b>	<b>10-6</b>	<b>16-5</b>
Ukupna građevna površina u m <sup>2</sup> /kW	<b>40-25</b>	<b>40-20</b>	<b>40-15</b>
Temperature apsorbera u °C	<b>150-400</b>	<b>450-1200</b>	<b>400-1200</b>
Godišnji stupanj djelovanja u %	<b>10-15</b>	<b>10-20</b>	<b>15-35</b>

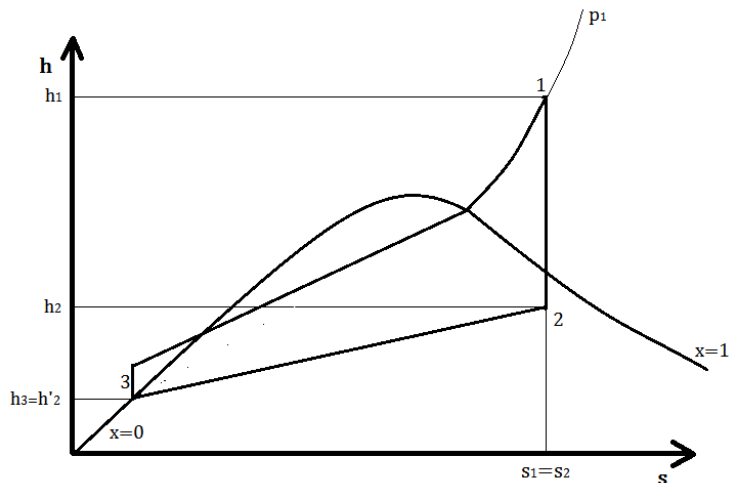
Tablica 6.2. Parametri usporedbe koncentrirajućih solarnih termoelektrana [35]

## 7. Proračun iskoristivosti na primjeru hipotetske solarne termoelektre s crtežom sheme postrojenja

Za reprezentativni primjer izračuna iskoristivosti hipotetske solarne termoelektre uzet ćemo solarnu termoelektre s paraboličnim žljebastim zrcalima koja sadrži solarni i parnoturbinski krug, budući da je to primjereniji slučaj u praksi zbog najbolje efikasnosti. Parnoturbinski krug smo zasad sveli na jednostavni krug s jednom turbinom i bez sustava međupregrijavanja.

Uzmimo da elektrana treba zadovoljavati izlaznu električnu snagu od  $P_{el} = 50 MW$  u blizini područja grada Šibenika oko podne u prosječnim uvjetima mjeseca prosinca. Iz literature [49] (str. 2167-2168) koja nam daje simulacijske podatke u nominalnim uvjetima za jednu takvu elektranu možemo izvući sljedeće parametre vezane za parnoturbinski krug (Rankine-ov parni krug):

- ulazna temperatura je  $t_1 = 370^\circ C$ , odnosno  $T_1 = 643,15 K$
- ulazni tlak,  $p_1 = 90 bar = 9 * 10^6 Pa$
- tlak u izlaznom tj. kondenzacijskom dijelu,  $p_2 = 0,08 bar = 0,008 * 10^6 Pa$



Sl. 7.1. h-s dijagram rada parnoturbinskog dijela

Prvi korak nam je za zadatak naći snagu turbine ( $P_{turb}$ ) koja se dobiva iz izraza:

$$P_{turb} = \dot{m} (h_1 - h_2) \quad (7.1)$$

gdje nam je:

$\dot{m}$  - maseni protok pare u parnoturbinskom krugu ,

$h_1$ - entalpija pregrijane vodene pare u točki 1 na dijagramu sa slike 7.1,

$h_2$ - entalpija pregrijane vodene pare u točki 2 na dijagramu sa slike 7.1.

Entalpiju ( $h_1$ ) možemo naći preko termodinamičkih tablica ili posebne aplikacije gdje se koristimo parametrima  $p_1 = 90 \text{ bar}$  i  $t_1 = 370^\circ\text{C}$  . Interpolacijom ili jednostavno aplikacijskim računanjem dolazimo do vrijednosti:

$$h_1 = 3023,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Također preko termodinamičkih tablica ili aplikacije slijedeći jednake parametre dobijemo entropiju ( $s_1$ ) u točki 1 na dijagramu sa slike 7.1. dolazimo do vrijednosti:

$$s_1 = 6,138 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

koja će nam trebati kasnije.

Dalje, entalpija ( $h_2$ ) bit će jednaka izrazu:

$$h_2 = h'_2 + x (h''_2 - h'_2) \quad [40](7.2)$$

gdje su nam:

$h'_2$  - entalpija vodene kapljevine u pri tlaku  $p_2 = 0,08 \text{ bar}$  koju nalazimo preko termodinamičkih tablica

$h''_2$  - entalpija vodene pare u pri tlaku  $p_2 = 0,08 \text{ bar}$  koju nalazimo preko termodinamičkih tablica .

Dok ćemo ( $x$ ) pronaći uz pomoć izraza:

$$s_2 = s'_2 + x (s''_2 - s'_2) \quad [40](7.3)$$

A budući da je  $s_1 = s_2$  što je i iz dijagrama 7.1.vidljivo, ( $x$ ) ćemo iz toga dobiti izrazom:

$$x = \frac{s_1 - s'_2}{s''_2 - s'_2} \quad (7.4)$$

gdje su nam:

$s'_2$ - entropija vodene kapljevine u pri tlaku  $p_2 = 0,08 \text{ bar}$  koju nalazimo preko termodinamičkih tablica,

$s''_2$  - entropija vodene pare u pri tlaku  $p_2 = 0,08 \text{ bar}$  koju nalazimo preko termodinamičkih tablica.

Iz toga dobijemo da je

$$x = \frac{6,138 - 0,5927}{8,227 - 0,5927}$$

$$x = 0,726.$$

Vraćamo se na izraz 7.2 pa dobivamo da je:

$$h_2 = 173,9 + 0,726 (2576 - 173,9)$$

$$h_2 = 1918,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Učin tj.snaga turbine dobit će se izrazom:

$$P_{turb} = \frac{P_{el}}{\eta_{elmeh} \eta_{gp} \eta_{turb}} \quad (7.5)$$

gdje su nam:

$\eta_{elmeh}$  - elektromehanička iskoristivost kod generatora struje koja iznosi 0,98 ,

$\eta_{gp}$  - iskoristivost generatora pare od 0,98 ,

$\eta_{turb}$  - iskoristivost turbine veličine 87,5% odnosno 0,875 ,

čije podatke nalazimo u literaturi [49] (str. 2167-2168). Gubitke na pumpi, cjevovodu i zanemerujemo jer su vrlo mali i ne ulaze u proračun. Dakle, snaga turbine će glasiti:

$$P_{turb} = \frac{50}{0,98 * 0,98 * 0,875}$$

tj.

$$P_{turb} = 59,5 \text{ MW}$$

Vraćajući se na izraz (7.1) maseni protok pare u parnoturbinskom krugu će glasiti:

$$\dot{m} = \frac{P_{turb}}{h_1 - h_2} \quad (7.6)$$

radi lakšeg računanja 59,5 MW ćemo prebaciti u  $59,5 * 10^3 \text{ kW}$ , te računati

$$\dot{m} = \frac{59,5 * 10^3}{3023,3 - 1918,7}$$

čime dobivamo da je

$$\dot{m} = 53,87 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Termodinamički stupanj korisnosti parnoturbinskog dijela koji nam je potreban kako bi kasnije izračunali ukupnu korisnost elektrane glasi:

$$\eta_T = \frac{P_{turb}}{\bar{Q}_{dov}} \quad (7.7)$$

gdje je :

$\bar{Q}_{dov}$  – dovedena toplina u jedinici vremena u (kJ/s) odnosno (kW) i glasi,

$$\bar{Q}_{dov} = \dot{m} (h_1 - h_3) \quad (7.8)$$

entalpija ( $h_3$ ) u točki 3 u trenutku kad se toplina dovodi je jednaka entalpiji ( $h'_2$ ) pa ćemo za ( $h_3$ ) uvrstiti vrijednost pa ćemo računati:

$$\eta_T = \frac{59,5 * 10^3}{53,87 (3023,3 - 173,9)}$$

$$\eta_T = 0,388$$

Ukupna snaga solarnog kruga ( $P_{us}$ ) će biti jednaka:

$$P_{us} = \frac{\bar{Q}_{dov}}{\eta_p} \quad (7.9)$$



gdje je ( $\eta_p$ ) učinkovitost pri prijelazu topline ili snage iz solarnog kruga u generator pare kod parnotrubinskog kruga i u standardu iznosi negdje oko 90% tj. 0,9 što nam daje

$$P_{us} = \frac{\dot{m} (h_1 - h_3)}{\eta_p} \quad (7.10)$$

$$P_{us} = \frac{53,87 (3023,3 - 173,9)}{0,9}$$

$$P_{us} = 170,552 \text{ MW}$$

Još ostaje izračunati korisnost i snagu kolektora ( $P_k$ ), te naposljetku potrebnu snagu sunčeva zračenja ( $P_s$ ) kao i potrebnu površinu kolektora ( $A$ ).

Snaga kolektora će biti:

$$P_k = \frac{P_{us}}{\eta_{us}} \quad (7.11)$$

gdje nam je ( $\eta_{us}$ ) stupanj iskoristivosti solarnog toplinskog kruga te iz raznih literatura možemo procijeniti da ona ima neki srednji iznosi od oko 70% odnosno 0,7 prvenstveno zbog energetske gubitaka u cijevima. Dakle,

$$P_k = \frac{170,552}{0,7}$$

$$P_k = 243,65 \text{ MW}$$

Za izračun iskoristivosti kolektora uzet ćemo da se koristimo eurotrough-150 (ET-150) kolektorima koji su duljine  $l=147\text{m}$  i aperturne površine  $A = 815\text{m}^2$ , budući se koriste na prostoru južne Europe (kao npr. u Almeriji na elektrani identične snage od 50 MW) i za sada su najoptimalniji. Specifikacije ET-150 su otprilike (svaka literatura daje drugačije ali približne podatke):

$F_R = 0,92$  - emisijski faktor,

$\rho = 0,92$  - refleksijski faktor površine reflektora (zrcala),

$\gamma = 0,75$  - faktor koji određuje koliki dio reflektirane energije od reflektora dođe na apsorber ili optička učinkovitost,

$(\tau\alpha)_{ef} = 0,94$

$\varepsilon = 0,14$  - toplinski emisijski faktor apsorbera pri radnoj temperaturi pri kojoj koristimo kolektor,

$R = 82$  - omjer koncentriranja kolektora.

Radna temperatura solarnog kruga iznosi 393°C odnosno  $T = 666.15\text{K}$  [49] (str. 2169).

Za izravno sunčevo zračenje uzimamo uzorak iz literature [35] (str.699 ) gdje možemo iz tablice vidjeti da je srednji dnevni hod ozračenosti vodoravne plohe sunčeve ozračenosti za Šibenik u razdoblju od 11h do 12h ili od 12h do 13h. Izravna ozračenost tada iznosi  $G_b = 116 \text{ W/m}^2$  na kolektore koji su ujedno tada postavljeni vodoravno pa ne moramo u proračun uključivati i kut nagiba kolektora.

Iz prikazanih parametara možemo pomoću izraza (2.4) izračunati iskoristivost solarnog kolektora ( $\eta_k$ ) , pa uvrštavamo:

$$\eta_k = 0,92 \left( 0,92 * 0,75 * 0,94 - \frac{0,14 * 5,67 * 10^{-8} * 666,15^4}{82 * 116} \right)$$

$$\eta_k = 0,446$$

Potrebna snaga sunčevog zračenja nam je naposljetku:

$$P_s = \frac{P_k}{\eta_k} \quad (7.12)$$

$$P_s = \frac{243,65}{0,446}$$

$$P_s = 546,3 \text{ MW}$$

Potrebnu ukupnu površinu kolektora izvest ćemo iz izraza (3.3) pa nam je:

$$A = \frac{P_s}{G_b} \quad (7.13)$$

$$A = \frac{546,3 * 10^6}{116}$$

$$A = 4,7 * 10^6 \text{ m}^2$$

Na kraju ćemo dobiti najbitniji faktor elektrane, a to je ukupni učinak elektrane ( $\eta_k$ ). Ako ulaznu snagu, tj.u ovom slučaju, snagu sunčevog zračenja ( $P_s$ ) podijelimo s izlaznom snagom elektrane, odnosno snagom električnog generatora ( $P_{el}$ ).

$$\eta_k = \frac{P_{el}}{P_s} \quad (7.14)$$

$$\eta_k = \frac{50}{546,3}$$

$$\eta_k = 0,09 = 9\%$$

Iz ovih dobivenih rezultata možemo zaključiti da je rad ovakve solarne termoelektrane s lokacijom kod Šibenika u prosincu još uvijek neisplativ iako se radi o periodu opskrbe strujom od 11h do 13h kada je sunčevo zračenje najjače u danu gdje je efikasnost elektrane manje od prosječne efikasnosti tipične solarne termoelektrane s parabolnim žljebastim kolektorima. Šibenik sam uzeo za probu iz razloga što bi od svih mjesta u Republici Hrvatskoj mogao najprije zadovoljavati uvjete jer je grad s većom sunčevom insolacijom od većine gradova u Hrvatskoj, na kopnu s pogodnim prostorom što omogućuje lakše instaliranje i integriranje u energetske sustav. A i površina od 4,7 km<sup>2</sup> korištena za elektranu bi bila dosta velika, s time da moramo uzeti u obzir da uz izračunatu površinu kolektora moramo i pridodati površinu koja je između kolektora.

Doduše, ovo su bili vrlo zahtjevni uvjeti za izvedbu solarne termoelektrane budući smo zahtjevali da elektrana radi punom nazivnom snagom u prosincu. Ako uzmemo iznos za iste sate u srpnju kad je insolacija najveća i da ostale eventualne promjenjive utjecaje ne uzimamo u obzir izravna sunčeva ozračenost ( $G_b$ ) tada iznosi 487 W/m<sup>2</sup> pa uvrštenjem te veličine u proračun dobivamo:  
 $\eta_k = 0,561$ ,

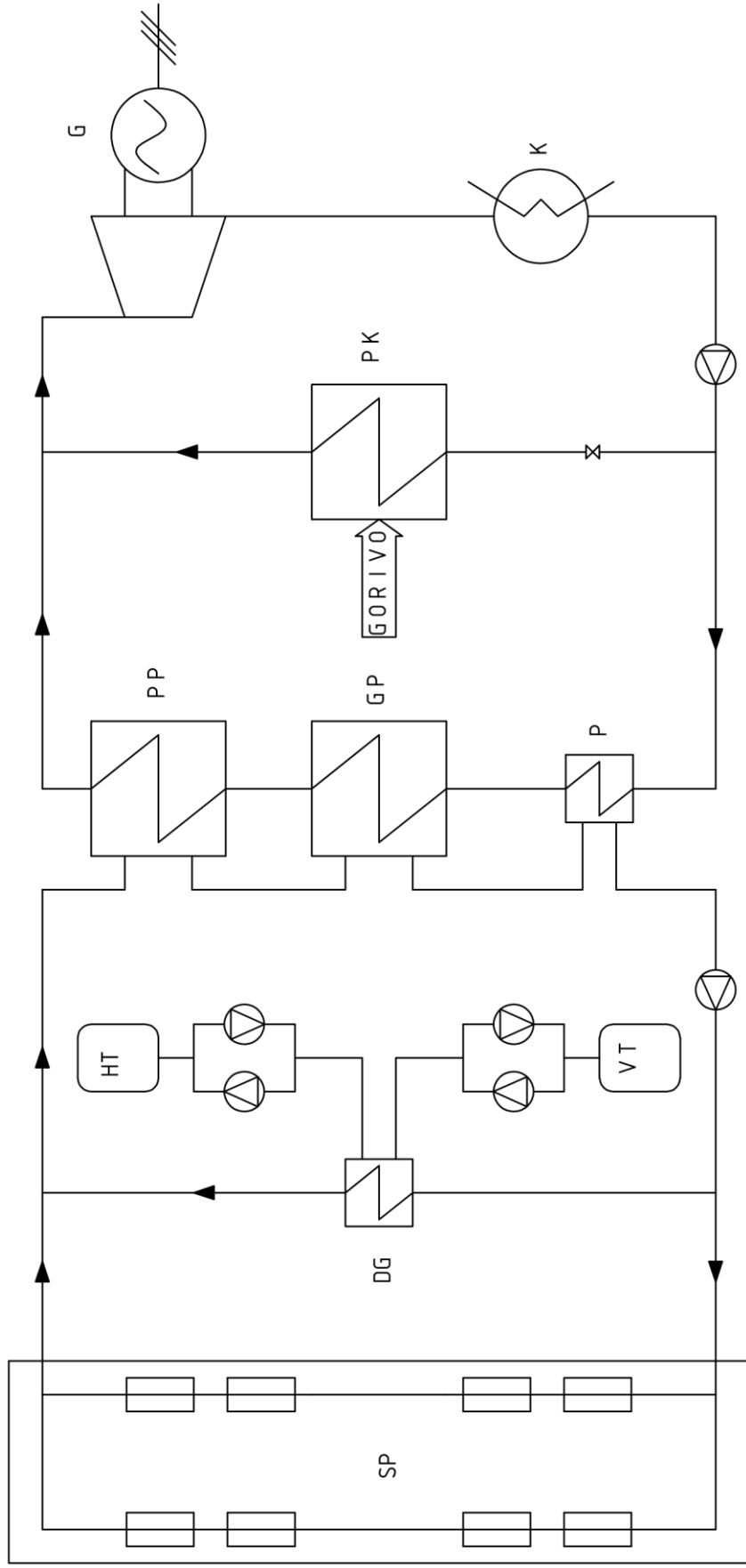
$$P_s = 434,3 \text{ MW},$$

$$A = 891\,786 \text{ m}^2,$$

$$\eta_k = 0,115 = 11,5\%$$

Sada iz rezultata za srpanj vidimo da su parametri elektrane na puno prihvatljivijem nivou, no ostaje pitanje na nama da procijenimo kolika je zasad isplativost da takva elektrana radi samo u ljetnom periodu.

Na sljedećoj stranici može se vidjeti crtež sheme jedne takve hipotetske elektrane. Ona bi obavezno uključivala hibridizaciju tj. dodatno korištenje nekog fosilnog goriva (najprimjerije plin za područje Hrvatske), budući ne bi zadovoljavala potražnju u zimskim periodima, gdje se vidi iz prethodnog proračuna.



SP-solarno polje  
 HT-hlandni tank  
 VT-vrući tank  
 DG-dodatni grijač  
 za regulaciju  
 topline

P-predgrijač pare  
 GP-generator pare  
 PP-pregrijač pare  
 PK-pomoćni kotao  
 ložen prirodnim plinom

T-turbina  
 G-generator  
 električne struje  
 K-kondenzator

SOLARNA TERMOELEKTRANA	
Božidar Marjanović	
br. crteža 1	

## 8. Zaključak

Sunčevo zračenje je ogroman potencijal izvora energije na Zemlji samo je pitanje tehničke izvedivosti koliko se može od tog potencijala iskoristiti u praksi. Solarne termoelektre predstavljaju veliki izazov današnjoj energetici ali ostavljaju dosta mogućnosti za razvoj. Možemo iz svega zaključiti da solarne termoelektre prije svega iziskuju angažman raznih znanstveno-tehničkih disciplina. Od fizikalne optike, fizike materijala, fizike zračenja, termodinamike, elektrotehnike, automatike, građevinarstva, kemije, meteorologije, te najbitnije, dovodi nas i do onog ekološkog aspekta zbog čega smo si i primarno postavili taj zadatak da se okušamo u takvom načinu proizvodnje električne energije ali i energije uopće. Da bi ostavili što manje negativan utjecaj na okoliš i pronašli vrlo održiv izvor energije što nam ovakav tip elektrana i omogućuje, nužno je pozabaviti se tom temom. A zbog svoje kompleksnosti proračuna i izvedbe je ujedno i zanimljiva.

Ove elektrane mogle bi biti velika prekretnica u svjetskoj energetici s obzirom da je njihovo najbolje iskorištenje moguće ostvariti u pustinjским predjelima gdje svojim brojnim zauzimanjem prostora neće smetati ostalim djelatnostima, nastambama, ali i uzrokovati će manje štete u slučaju neke nesreće. Prilika je to da zemlje koje su siromašne klasičnim resursima a bogate sunčevom insolacijom (što je čest slučaj) podignu privredni standard. Jer uz hidroelektre, solarne termoelektre su elektrane iz područja obnovljivih izvora energije koje bi mogle u budućnosti zadovoljiti veću potražnju energije kakvu nude brojne klasične termoelektre.

Ovaj dio energetike je još podosta neotkriven te se još uvijek podosta nalazi u inovacijskim povojima iako vidimo da su ideje i koncepti razvijani čak i prije konvencionalnog korištenja nekih fosilnih goriva koja su danas u konvencionalnoj uporabi. Posebno u Republici Hrvatskoj solarne termoelektre nisu ozbiljno uzete u obzir. Doduše, isplativost još nije na razini na kojoj nude lokacije između 40° južne i sjeverne geografske širine u sušnijim predjelima Zemlje ali s razvojem tehnologija koje se bave problematikom solarnih termoelektrana za očekivati je da bi u bliskoj budućnosti i kod nas taj tip elektrana mogao doseći konkurentnu isplativost jer kao što vidimo, cijene izvedbe tih elektrana generalno opadaju. Ne zaboravimo da se Hrvatska dijelom nalazi na Sredozemlju i da taj dio Hrvatske (Dalmacija, južna Istra) je samo stepenicu niže od uvjeta koju nudi Španjolska gdje su već instalirane brojne solarne termoelektre. Uz to, moramo navesti i detalj da su većinom ovakave elektrane u mogućnosti hibridizacije s pogonima na plinsko gorivo čije rezerve imamo pa možemo osmišljavati integraciju solarnih termoelektrana s plinovodima. No, pa čak i da se kod nas ne isplate instalirati takve elektrane može nam se otvoriti mogućnost za sudjelovanje u proizvodnji komponenata solarnih termoelektrana i ostalom poslovanju posredno i neposredno vezanom za to.

U svakom slučaju, iako pustinjska prostranstva ne obiluju resursima za život kao što su hrana i voda, vrlo su iskoristiva za gradnju solarnih termoelektrana jer su nenastanjeni prostor koji ostavlja mogućnosti nesmetane gradnje velikih površina, a sačinjavaju ih prostori visoke insolacije gdje je recimo samo jedan manji dio Sahare dostatan za opskrbljivanje velikog dijela svijeta. Tako da od sada pustinjske dijelove svijeta moramo razmatrati kao globalni potencijal, a ne neželjeni prostor.

## Literatura:

### Slikovni izvori:

- [1] <http://www.zelenaenergija.org/blobs/> (stranici pristupljeno: 21.8. 2015.)
- [2] <http://image.made-in-china.com/> (stranici pristupljeno: 23.8.2017.)
- [3] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/> (stranici pristupljeno 23.8.2017.)
- [4] <http://www.smithsustainabledesign.com/> - tvrtka koja se bavi instalacijom uređaja za iskorištavanje obnovljivih izvora energije (stranici pristupljeno: 24.8.2017)
- [5] <http://www.bhstring.net/> - portal vijesti iz BiH (stranici pristupljeno: 24.8. 2017)
- [6] <https://image.slidesharecdn.com/> (stranici pristupljeno: 24.8.2017)
- [7] <http://www.appropedia.org/> - stranica za poticanje građana ka korištenju novih obnovljivih izvora energije (stranici pristupljeno: 26.8.2017.)
- [8] <http://upload.wikimedia.org/> (stranici pristupljeno: 1.9.2017.)
- [9] <https://4.bp.blogspot.com/> (stranici pristupljeno: 1.9.2017.)
- [11] <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/> (stranici pristupljeno: 2.9.2017.)
- [12] <https://image.slidesharecdn.com/> (stranici pristupljeno: 2.9.2017.)
- [13] <http://pubs.rsc.org/services/images/> (stranici pristupljeno: 2.9.2017)
- [14] <http://ars.els-cdn.com/content/image/> (stranici pristupljeno: 2.9. 2017)
- [15] <https://www.volker-quaschning.de/> -portal izvješća o energetici (stranici pristupljeno: 3.9. 2017)
- [16] <http://i2.cdn.cnn.com/> (stranici pristupljeno: 3.9. 2017.)
- [17] <http://www.sbp.de/> - arhitektonska tvrtka Schlaich-Bergemann Partner (stranici pristupljeno:8.9. 2017)
- [18] <http://www.seao2.com/solarsphere/> (stranici pristupljeno: 3.9.2017)
- [19] <https://www.volker-quaschning.de/> - portal izvješća o energetici (stranici

pristupljeno: 3.9. 2017)

[20] <http://cdn.theatlantic.com/static/infocus/> (stranici pristupljeno:no 4.9.2017.)

[21] <http://2.bp.blogspot.com/> (stranici pristupljeno: 4.9.2017.)

[22] <http://letitshinecsp.skola.edu.mt/> - NSTF Project – School Contest For Young Scientists (stranici pristupljeno:5.9. 2017.)

[23] <http://cleanleap.com/> - portal o ekologiji (stranici pristupljeno: 4.9.2017.)

[24] <http://3.bp.blogspot.com/> (stranici pristupljeno: 6.9. 2017.)

[25] <https://www.eac.com.cy/> - grčki portal o el. Struji (stranici pristupljeno:8.9. 2017)

[26] <http://www.bine.info/> (stranici pristupljeno:8.9. 2017)

[27] <https://s3.amazonaws.com/> (stranici pristupljeno: 8.9. 2017)

[28] <http://www.solaripedia.com/> -portal o sunčevoj energiji(stranici pristupljeno: 8.8. 2017.)

[29] <http://news.nationalgeographic.com/> (stranici pristupljeno: 11.9.2017.)

[30] <http://blog.fabric.ch/> (stranici pristupljeno: 11.9.2017.)

[31] <http://www.mdpi.com/> - znanstveni vijesnik (stranici pristupljeno: 12.9.2017.)

[32] <https://www.google.hr/> (stranici pristupljeno: 12.9.2017.)

[33] <https://www.researchgate.net/> - znanstveni portal(stranici pristupljeno: 3.9.2017.)

## Tekstualni izvori:

[34] Neil Schlager i Jayne Weisblatt: Alternative energy, Thompson Gale, 2006.

[35] \*Ljubomir Majdandžić: Solarni sustavi, Graphis d.o.o., Zagreb, 2010.

[36] Vladimir Knapp i Petar Kulušić: Novi izvori energije (Nuklearna energija fisije i fuzije i sunčana energija), Školska knjiga, Zagreb, 1985.

[37] Petar Kulušić: Novi izvori energije (Sunčana energija i energija vjetra), Školska knjiga, Zagreb, 1991.

\*literatura uzeta kao glavni izvor za rad



- [38] Zdeslav Matić: Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske (Priručnik za energetska korištenje Sunčevog zračenja), Energetski institute Hrvoje Požar, Zagreb, 2007.
- [39] Božo Udovičić: Energetika, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- [40] Nedjeljka Petrić, Ivo Vojnović i Vanja Martinac: Tehnička termodinamika, Kemijsko-tehnološki fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2015.
- [41] Mukund R. Patel: Wind and solar powerplant systems, U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, CRC Press, 1999.
- [42] Vladimir Potočnik: Obnovljivi izvori energije i zaštita okoliša u Hrvatskoj, Ministarstvo zaštite okoliša i prostornog uređenja, Zagreb, 2002.
- [43] Ognjen Čaldarović: Energetska ograničenja i energetske alternative Hrvatske, Agencija za posebni otpad, Zagreb, 1993.
- [44] Josip Planinić: Osnove fizike III, Filozofski fakultet u Osijeku, Osijek, 2005.
- [45] Branka Penzar i suradnici: Meteorologija za korisnike, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [46] Danilo Feretić, Željko Tomšić, Dejan Škanata, Nikola Čavlina, Damir Subašić: Elektrane i okoliš, Element, Zagreb, 2000.
- [47] Kuzma Ražnjević: Termodinamičke tablice, Svjetlost, Sarajevo, 1989.
- [48] Ricardo Vasquez Padilla, Gokmen Demirkaya, D. Yogi Goswami, Elias Stefanakos, Muhammad M. Rahman: Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver, (članak iz zbirke "Applied Energy"), Elsevier, 2011.
- [49] M.J. Montes, A. Abanades, J.M. Martinez-Val, M. Valdes: Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors, (članak iz "Solar Energy"), Elsevier, 2009.
- [50] Marc Medrano, Antoni Gil, Ingrid Martorell, Xavi Potau, Luisa F. Cabeza: State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies, (članak iz "Renewable and Sustainable Energy Reviews"), Elsevier, 2009.
- [51] A. Fernandez-Garcia, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Perez: Parabolic-trough solar collectors and their applications, (članak iz "Renewable and Sustainable Energy Reviews"), Elsevier, 2010.
- [52] [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_thermal\\_power\\_stations](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations) (stranici pristupljeno: 21.8.2016.)

[53] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ivanpah\\_Solar\\_Power\\_Facility](https://en.wikipedia.org/wiki/Ivanpah_Solar_Power_Facility) (stranici pristupljeno: 21.8. 2016.)

[54] [https://sh.wikipedia.org/wiki/Solarna\\_uzgonska\\_elektrana](https://sh.wikipedia.org/wiki/Solarna_uzgonska_elektrana) (stranici pristupljeno: 12.9. 2017.)

[55] Robert Pitz Paal, Klaus Hennecke, Peter Heller, Reiner Buck: Solar thermal power plants, FIZ Karlsruhe GmbH - Leibniz Institute, Eggenstein-Leopoldshafen, 2013.

[56] <http://www.imeche.org> – stranica mehaničkih inženjera (stranici pristupljeno: 13. 9.2017.)

[57] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinsko\\_uskladištenje\\_sunčeve\\_energije](https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinsko_uskladištenje_sunčeve_energije) (stranici pristupljeno: 13. 9.2017.)

[58] <http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/HEDH/HTF-VP1.PDF> - podaci o fizičkim i kemijskim svojstvima termalnog ulja therminol VP-1 (stranici pristupljeno: 21. 7. 2015.)