

# Seawater Steam Engine - Tehnički aspekti evaporacije morske vode u solarnom paraboličkom kolektoru

---

Azinović, Kristina

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:437648>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-15**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Kristina Azinović

*Seawater Steam Engine* – Tehnički aspekti evaporacije morske vode u  
solarnom paraboličnom kolektoru

**DIPLOMSKI RAD**

Voditelji rada:       Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Glasnović  
                              Dr. sc. Karmen Margeta

Članovi ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Glasnović  
Prof. dr. sc. Ante Jukić  
Dr. sc. Karmen Margeta

Zagreb, rujan 2018.

*Zahvaljujem se svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Zvonimiru Glasnoviću, na stručnom vodstvu, vrlo korisnim savjetima i pomoći prilikom izrade rada. Hvala Vam na uloženom trudu, volji i pruženoj potpori te korisnim diskusijama tijekom izrade ovog rada. Najljepše hvala na znanju kojeg ste prenijeli na mene.*

*Zahvaljujem se dr.sc. Karmen Margeta, koja je pratila i vodila ovaj rad od samog početka, uvijek bila spremna pomoći i udijeliti savjet. Hvala Vam na uloženom vremenu posvećenom izradi ovog rada, susretljivosti i svim ustupljenim materijalima.*

*Hvala mojim kolegama i prijateljima koji su uvijek bili tu kada bi zatrebalo. Hvala Vam na beskrajnoj podršci, razumijevanju i što ste mi vrijeme provedeno na fakultetu uljepšali svojim prisustvom.*

*Naposljetku, veliko hvala mojim roditeljima, obitelji i Jakovu. Hvala što ste uvijek bili tu za mene, bez obzira da li se radilo o teškim ili sretnim trenucima. Hvala na beskrajnoj podršci, svakom osmijehu i riječima ohrabrenja. Hvala Vam što ste u svakom trenutku stajali uz mene i bili tu kada je to bilo najpotrebnije!*

## SAŽETAK

Tehnologija *Seawater Steam Engine* (SSE) omogućava istovremenu proizvodnju energije i pitke vode koristeći tri prirodna resursa (solarnu energiju ili energiju nekog drugog obnovljivog izvora energije, morsku vodu i gravitaciju) koji ima potencijal da cijeli svijet opskrbi energijom i pitkom vodom i na taj način zaustavi klimatske promjene. Indikativno je da je 19.06.2018. Ministarstvo energetike SAD-a, Department of Energy (DOE), pokrenulo program „Solar Desalination“ koji ima za cilj istraživanje i razvoj komponenti tehnologije, koja na isti način kao i SSE tehnologija, može proizvoditi i energiju i pitku vodu, a što je više nego jasna potvrda značaja i znanstveno-istraživačkog potencijala koje pruža SSE tehnologija.

Radom su prikazani tehnički aspekti evaporacije morske vode u solarnom paraboličnom kolektoru koji u osnovi predstavlja generator pare, u koji direktno ulazi morska voda, isparava se u apsorpcijskim cijevima kolektora, nakon čega se te dvije faze (para i koncentrirana morska voda) razdvajaju u visokotlačnom separatoru. Para se odvodi do turbina, na čijoj osovinu su i generatori koji proizvode električnu energiju, nakon kojih se para kondenzira i dobiva se destilirana voda. Obradom te destilirane vode se dobiva pitka voda. U svrhu provjere primjene SSE tehnologije u svijetu, odabrane su četiri lokacije: Miami (SAD), Vis (Hrvatska), Dubai (UAE) i Kunigami (Japan) koje se nalaze u različitim klimatskim uvjetima, odnosno s različitim vrijednostima dominantnog ulaznog parametra sustava, a to je direktno solarno zračenje (Miami: 1491 kWh/m<sup>2</sup>a, Vis: 1578 kWh/m<sup>2</sup>a, Dubai: 1605 kWh/m<sup>2</sup>a i Kunigami: 957 kWh/m<sup>2</sup>a).

Proračun potrebne snage SSE tehnologije, načinjen je metodom linearne korelacije, odnosno usporedbom s rezultatima koji su dobiveni za otok Vis i na taj način su dobivene snage po stanovniku, jedinične proizvodnje toplinske energije i jedinične proizvodnje pitke vode. Za Miami 15.1 MW, 434 kWh/m<sup>2</sup>a, 1.22 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a; za Vis 14.3 MW, 459 kWh/m<sup>2</sup>a, 1.29 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a; za Dubai 13.6 MW, 467 kWh/m<sup>2</sup>a, 1.32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a; i za Kunigami 23.6 MW, 278 kWh/m<sup>2</sup>a, 0.78 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a; respektivno; a što predstavlja vrlo važne istraživačke rezultate. Naime, oni pokazuju da se i na lokacijama s relativno manjim količinama globalnog solarnog zračenja, a relativno čistom atmosferom i relativno velikim količinama direktnog solarnog zračenja, kao što su to lokacija Miami i Visa, može vrlo ekonomično koristiti SSE tehnologija.

**Keywords:** *Seawater Steam Engine, solarni parabolični kolektori, Sunčeva energija, morska voda, pitka voda, održiva zajednica*

## ABSTRACT

The Seawater Steam Engine (SSE) technology enables simultaneous energy and drinking water production using three natural resources (solar energy or energy of another renewable energy source, seawater and gravity) and has the potential to supply the whole world with energy and drinking water and thus stop climate changes. It is indicative that 19.06.2018. the US Department of Energy (DOE) has launched a Solar Desalination program which main goal is to research and develop a technology that can produce energy and drinking water in the same way as SSE technology, so that is more but a clear confirmation of the importance and scientific-research potential offered by SSE technology.

This paper shows the technical aspects of evaporation seawater in the solar parabolic collector, which is basically a steam generator in which seawater directly enters. Seawater evaporates in the absorber tubes of the collectors, entering into a high pressure separator where two phases (steam and concentrated seawater) are separating. The steam is then drain away on the turbine, on which axle are the generators that produce electricity, after which the steam is condensed and distilled water is received. Treating this distilled water, drinking water is produced. In order to verify the application of SSE technology in the world, four locations have been selected: Miami (USA), Vis (Croatia), Dubai (UAE) and Kunigami (Japan), which are in different climatic conditions and with different values of the dominant input parameter system, a direct solar radiation (Miami: 1491 kWh/m<sup>2</sup>a, Vis: 1578 kWh/m<sup>2</sup>a, Dubai: 1605 kWh/m<sup>2</sup>a and Kunigami: 957 kWh/m<sup>2</sup>a).

The calculation of the required power of SSE technology was made by a linear correlation method, by comparison with the results obtained for the island of Vis and results are given for power per population, heat production and production of drinking water. For Miami 15.1 MW, 434 kWh/m<sup>2</sup>a, 1.22 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a; for Vis 14.3 MW, 459 kWh/m<sup>2</sup>a, 1.29 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a; for Dubai 13.6 MW, 467 kWh/m<sup>2</sup>a, 1.32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a; and for Kunigami 23.6 MW, 278 kWh/m<sup>2</sup>a, 0.78 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a; respectively; which is very important research results. Namely, they show that SSE technology can be very economical in locations with relatively small amounts of global solar radiation, with a relatively clean atmosphere and relatively large amounts of direct solar radiation, such as the Miami and Vis locations.

**Keywords:** *Seawater Steam Engine, solar parabolic collectors, solar energy, sea water, drinking water, sustainable community*

## SADRŽAJ:

1. UVOD .....	1
2. OPĆI DIO .....	4
2.1. Povijesni razvoj solarnih paraboličnih kolektora .....	4
2.2. Princip rada DSG tehnologije.....	7
2.3. Karakteristike solarnih paraboličnih kolektora.....	8
2.3.1. Parabolično zrcalo .....	10
2.3.2. Cijev solarnog paraboličnog kolektora .....	12
2.4. Strujanje radnog fluida kroz horizontalnu cijev kolektora .....	14
2.5. Princip rada DSG paraboličnog kolektorskog sustava .....	18
2.6. Znanstveni i tehnološki iskorak Seawater Steam Engine tehnologije .....	20
2.7. Tehnološki koncept <i>Sewater Steam Engine</i> tehnologije.....	22
2.8. Proračuni proizvodnje toplinske i električne energije iz SSE tehnologije .....	24
2.9. Proračuni proizvodnje pitke vode.....	27
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	28
3.1. Studije slučaja.....	28
3.2. Ulazni klimatološki podaci .....	29
4. REZULTATI.....	35
5. RASPRAVA I ZAKLJUČCI .....	41
POPIS SIMBOLA: .....	43
LITERATURA:.....	45
ŽIVOTOPIS: .....	48

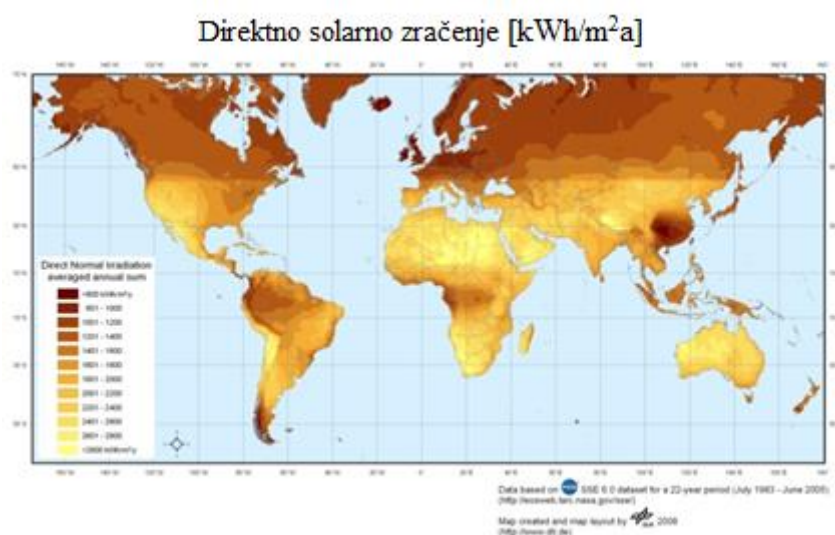
## 1. UVOD

Više nema nikakvih sumnji da su klimatske promjene izazvane ljudskim djelovanjem i njihovom nebrigom za okoliš. Zagađenja uzrokovana upotrebom fosilnih goriva (ugljena, nafte i prirodnog plina), visoke koncentracije ugljičnog dioksida i druge promjene u atmosferi i oceanima te nedostatak pitke vode, samo su neke posljedice koje traže brzo i efikasno rješavanje kako bi se prirodni sustav vratio u svoju ravnotežu.

Danas je primarni cilj zamjena upotrebe fosilnih goriva s obnovljivim izvorima energije, i u tom smislu zemlje u svijetu pokušavaju pronaći zajednički sporazum [1] (Pariški sporazum o klimi i klimatskim promjenama) te potaknuti zemlje na zajedničko djelovanje kako bi se ublažile posljedice klimatskih promjena.

Međutim, za efikasno rješavanje problema klimatskih promjena nije dovoljno postići samo zajednički dogovor već je potrebno razviti i nove tehnologije temeljene na obnovljivim izvorima energije koje će doprinijeti rješavanju nastalih problema.

U tom smislu, solarni termalni koncentratorski sustavi imaju sve veći značaj jer se s povećanjem koncentracije povećava i efikasnost tih sustava, a što u osnovi znači i da se na taj način može bolje iskoristiti solarno zračenje, a što za posljedicu ima i manju investiciju u te sustave i manje površine koje zauzimaju. Međutim, područja na kojima se danas mogu ekonomično koristiti takvi sustavi ovise o lokalnoj klimi. Na Slici 1. su pokazana ta područja.



Slika 1. Potencijal primjene solarnih termalnih koncentratorskih sustava [2].

Dakle, na područjima na kojima je direktno solarno zračenje (koje je mjerodavno za korištenje koncentratorskih sustava) u vrijednostima preko 1200 kWh/m<sup>2</sup>/a, mogu se ekonomično koristiti solarni termalni koncentratorski sustavi i jasno je da će na većim dozračenim energijama ta ekonomičnost biti i veća. Iako su dozračene solarne energije na manjim geografskim širinama veće, one ipak ovise o lokalnoj klimi koju određuju i mnogi drugi parametri.

S druge strane, s globalnim zagrijavanjem se povećavaju i ta područja ekonomične primjene solarnih termalnih sustava, tako da se tu radi o jednom dinamičkom procesu koji ovaj negativan efekt globalnog zagrijavanja može koristiti za sve veću primjenu solarnih koncentratorskih sustava.

Od svih solarnih termalnih sustava, danas najveću efikasnost postižu oni s paraboličnim kolektorima, pri čemu su upravo zbog efikasnosti, ali i ekološke prihvatljivosti najinteresantniji tzv. *Direct Steam Generation* (DSG) sustavi.

Princip rada te tehnologije se sastoji u tome da se destilirana voda zagrijava u cijevi solarnih paraboličnih kolektora, a dobivena para, uslijed djelovanja sunčevog zračenja i dodatnim zagrijavanjem, koristi za pokretanje turbina i proizvodnju električne energije.

DSG tehnologija bila je osnova i za razvoj radikalno nove tehnologije nazvane "*Seawater Steam Engine*" koje su osmislili hrvatski znanstvenici [3] i koja je opisana u ovom radu.

"*Seawater Steam Engine*" tehnologija u odnosu na DSG tehnologiju razlikuje se sljedećem:

1) ***korištenje morske vode kao radnog fluida*** - (97% vode na Zemlji je slana voda mora i oceana što predstavlja veliki prirodni resurs);

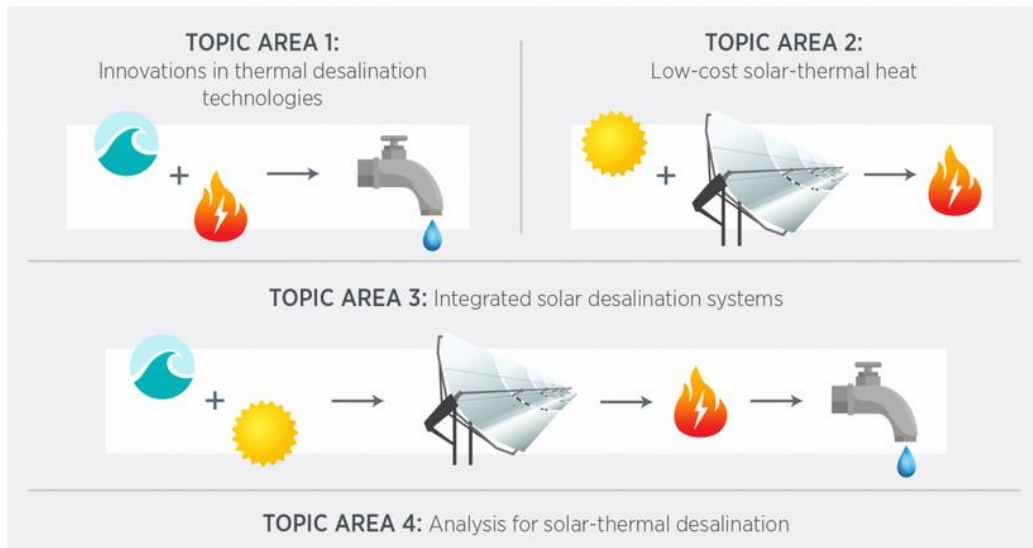
2) ***istovremeno i kontinuirano dobivanje i energije i pitke vode*** (evaporacija morske vode u solarnom paraboličnom kolektoru predstavlja potpuno novo tehnološko rješenje korištenjem obnovljivih izvora energije);

3) ***omogućava izgradnju održivih zajednica.***

Slijedom tog inovativnog koncepta „*Seawater Steam Engine*“ tehnologije koji ima potencijal da cijeli svijet opskrbi energijom i pitkom vodom i na taj način zaustavi klimatske promjene, 19.06.2018. Ministarstvo energetike SAD-a, Department of Energy (DOE), pokrenulo je program „*Solar Desalination*“ (u kojem programu je angažirano 14 američkih znanstveno istraživačkih institucija s ulaganjem od 21 milijun dolara) koji ima za cilj istraživanje i razvoj komponenti tehnologije, koja na isti način kao i SSE tehnologija (*vidljivo iz opisa planiranih istraživanja pojedinih institucija i fizikalno-kemijskih uvjeta u koje se*



morska voda stavlja jer do danas još nema podataka o termofizičkim svojstvima morske vode na temperaturama preko 200 °C i tlakovima od 80 bara, (Sharquawy, 2010) [4]), može proizvoditi i energiju i pitku vodu, Slika 2., a što je više nego jasna potvrda značaja i znanstveno-istraživačkog potencijala koji pruža SSE tehnologija.

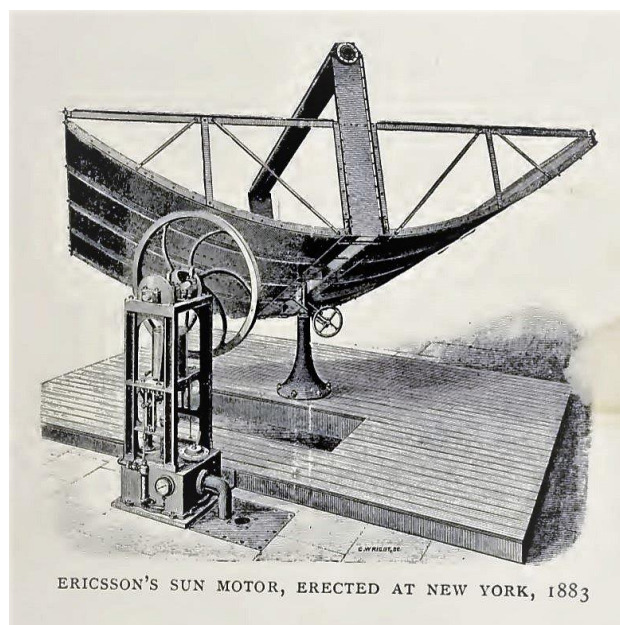


Slika 2. Program „Solar Desalination“, Ministarstvo energetike SAD-a, Department of Energy (DOE) [5].

## 2. OPĆI DIO

### 2.1. Povijesni razvoj solarnih paraboličnih kolektora

Izrada paraboličnog kolektor površine  $3.25 \text{ m}^2$  sa  $373 \text{ W}$  motorom, 1870. godine, koji je konstruirao John Ericsson iz SAD-a, smatra se početkom razvoja solarnih paraboličnih kolektora. 1883. godine konstruirao je tzv. „sunčani motor“, dužine  $3.35 \text{ m}$  i širine  $4,88 \text{ m}$  sa apsorpcijskom cijevi promjera  $15.88 \text{ cm}$  (Slika 3). Kroz narednih nekoliko godina John Ericsson razvijao je i solarni parabolični kolektor od  $1.86 \text{ kW}$ . Međutim, zbog iznenadne smrti, njegov projekt nikad nije dovršen [6].



*Slika 3. Nacrt solarnog paraboličnog kolektora Johna Ericssona iz 1883. godine [7].*

U razdoblju od 1906. - 1911. godine Frank Shuman (SAD) posvetio se istraživanju i razvijanju solarnih kolektora. 1912. godine projektirao je veliko postrojenje za navodnjavanje u Meadi, malom poljoprivrednom naselju pored rijeke Nil u Egiptu. Sustav se sastojao od pet redova paraboličnih kolektora dužine  $62.17 \text{ m}$  i širine  $4.1 \text{ m}$ . Teoretska očekivanja bila su da sustav može proizvesti energiju od  $75 \text{ kW}$ . No, stvarni rezultati varirali su od  $14 \text{ kW}$  –  $54 \text{ kW}$ , dok je najčešća vrijednost proizvodnje energije iznosila oko  $40 \text{ kW}$ . Postrojenje je uspješno započelo s radom naredne godine, ali zbog skorog izbijanja Prvog svjetskog rata i tadašnje izrazito niske cijene fosilnih goriva na tržištu, prestaje s radom nakon dvije godine.

Unatoč tome što je cjelokupni sustav solarnih paraboličnih kolektora prestao s radom, patentiran je 1917. godine (Slika 4) [6].



*Slika 4. Shumanovo postrojenje solarnih paraboličnih kolektora u Meadi, Egipat [8].*

Daljnji interes za korištenje solarnih paraboličnih kolektora ponovno se javlja krajem 70-ih 20. stoljeća radi znatnog povećanja cijena fosilnih goriva. Tvrtka Acurex u SAD-u je u razdoblju od 1977. do 1982. instalirala parabolične solarne sustave s ukupnom površinom od oko 10.000 m<sup>2</sup> za primjenu u procesima izmjene topline.

Godine 1983. Luz International Limited počinje s razvojem solarnih paraboličnih kolektora u pustinji Mojave, Kalifornija, SAD. Postrojenja su započela s radom 1985. i 1986. godine te su nazvana „Solar Electric Generating System“ (SEGS) I i II, a nakon toga došlo je do razvoja SEGS III - SEGS IX postrojenja. Na samom početku veličina postrojenja bila je ograničena snagom od 30 MW, ali je kasnije ona podignuta na 80 MW. U konačnici je izgrađeno devet postrojenja s ukupnim kapacitetom od 354 MW (Slika 5.), a iz karakteristika SEGS postrojenja vidljivo je znatno povećanje količine energije sa izgradnjom svakog novog SEGS postrojenjem (Tablica 1.) [9]. Tako postrojenje od ukupno  $A_{\text{coll}} = 483,960 \text{ m}^2$  kolektorskog sustava proizvede godišnje  $E_{\text{el}} = 256 \text{ GWh}$  električne energije.



Slika 5. SEGS III-SEGS VII postrojenja solarnih paraboličnih kolektora [9].

Tablica 1. Karakteristike SEGS I – SEGS IX postrojenja [9]

SEGS postrojenje	Početak rada (god.)	Električna energija na izlazu [MWe]	Temperatura na izlazu [°C]	Površina kolektorskog sustava [m <sup>2</sup> ]	Godišnja proizvodnja električne energije [GWh <sub>e</sub> ]
<b>I</b>	1985	13.8	307	82,960	30
<b>II</b>	1986	30	316	190,338	80
<b>III/IV</b>	1987	30	349	230,300	93
<b>V</b>	1988	30	349	250,500	93
<b>VI</b>	1989	30	390	188,000	91
<b>VII</b>	1989	30	390	194,280	93
<b>VIII</b>	1990	80	390	464,340	253
<b>IX</b>	1991	80	390	483,960	256

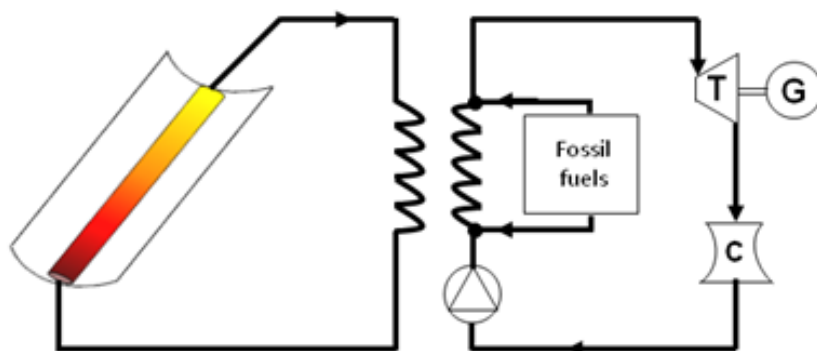
Komercijalna postrojenja sa solarnim paraboličnim kolektorima zabilježena su tek 2007. godine u Nevadi (SAD) gdje je otvoren „Nevada Solar One“ kapaciteta 64 MW.

Prvi komercijalni parabolični kolektori u Europi izgrađeni su 2008. godine u provinciji Granada u blizini planina Sierra Nevada (Španjolska). Postrojenje je nazvano Andasol I, a već iduće godine pripojeno mu je i drugo postrojenje, Andasol II. Krajem te iste godine pripojeno je i postrojenje Andasol III. Svako od tri postrojenja raspolaže kapacitetom energije od 50 MW. Danas je upotreba ovakvih sustava prihvaćena i u drugim zemljama i u tom smislu se realizira sve više projekata (osim u SAD-u i Španjolskoj) u Indiji, Kini, Egiptu, Alžiru, Maroku i Australiji.

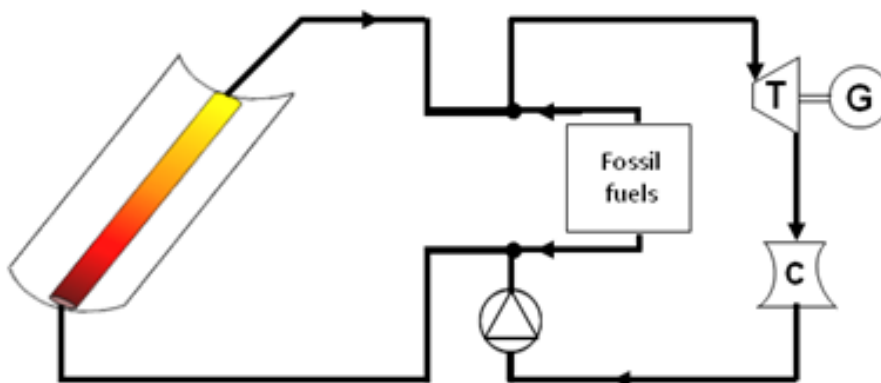
## 2.2. Princip rada DSG tehnologije

Princip rada klasične solarne elektrane koje za svoj rad koristi termalno ulje kao radni fluid prikazan je na Slici 6., dok je na Slici 7. prikazana DSG tehnologija koja kao radni fluid koristi vodu. Razlike između klasičnih solarnih elektrana i DSG tehnologije u odnosu na radni fluid dane su u Tablici 2. [8].

Princip rada DSG tehnologije zasniva se na direktnom nastanku parne faze iz vode kao radnog fluida zbog zagrijavanja apsorpcijske cijevi paraboličnog kolektora uslijed djelovanja solarnog zračenja. Prilikom zagrijavanja dolazi do isparavanja vode, a zatim se parna faza dogrijava te potom pregrijana para dolazi do turbina, čijim pokretanjem se dobiva električna energija [10].



Slika 6. Princip rada solarne elektrane s uljem kao radnim fluidom (K. Margeta).



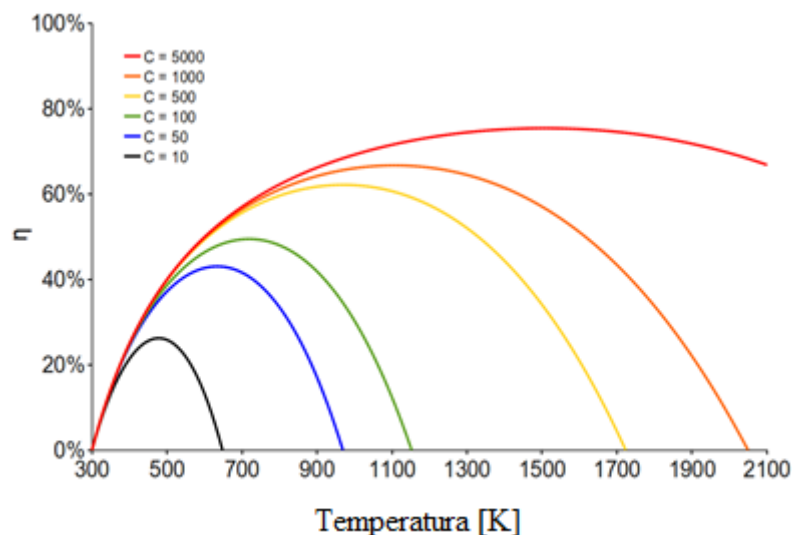
Slika 7. Princip rada DSG tehnologije (K. Margeta).

Tablica 2. Razlike između klasičnih solarnih elektrana i DSG tehnologije u odnosu na radni fluid [8].

	ULJE kao radni fluid	DSG
<b>PREDNOSTI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ komercijalno razvijeni</li> <li>→ jednofazni protok</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Radni fluid koji ne zagađuje okoliš</li> <li>→ Visoke temperature &gt; 400 °C → <b>VELIKA EFIKASNOST SUSTAVA!</b></li> <li>→ Jednostavnost postrojenja</li> </ul>
<b>NEDOSTACI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Temperature &lt; 400 °C</li> <li>→ manja učinkovitost</li> <li>→ <b>ŠTETAN UTJECAJ NA OKOLIŠ!</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Dvofazni protok u prijemnoj cijevi kolektora</li> <li>→ Mogućnost velikih temperaturnih gradijenata</li> <li>→ Potrebna velika kontrola sustava</li> </ul>

### 2.3. Karakteristike solarnih paraboličnih kolektora

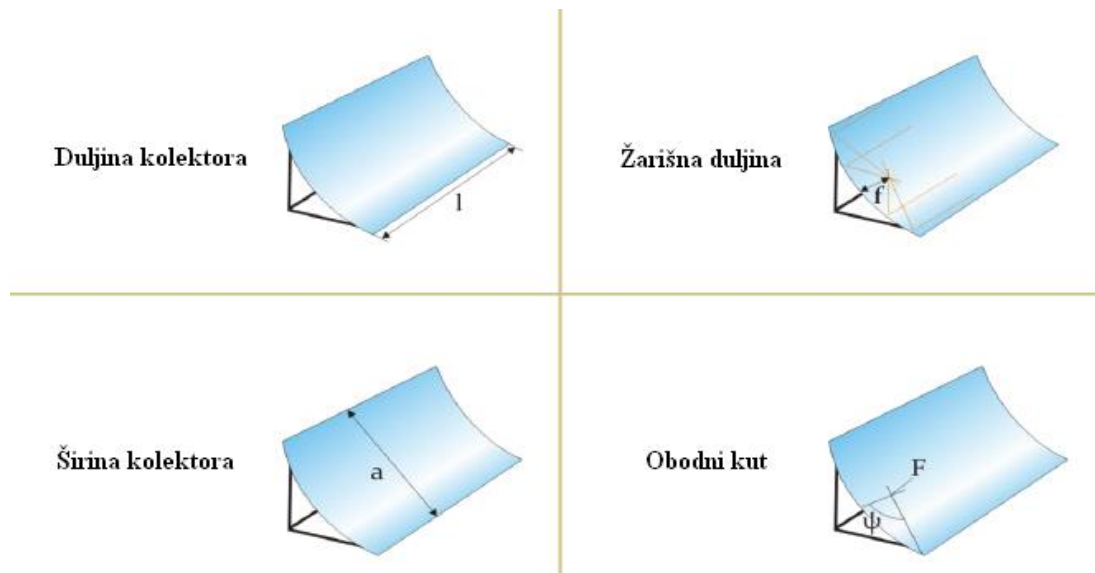
Solarni parabolični kolektori koncentriraju Sunčevu svjetlost na apsorpcijsku cijev u fokusu kolektora i zagrijevaju radni medij (apsorbenta) koji kroz njega struji. Ukoliko je ta koncentracija veća, onda se postižu i veće temperature apsorbenta, a time i veća efikasnost. Na Slici 8. se vidi da se s povećanjem koncentracije povećavaju i temperature, a time i ukupna efikasnost koncentratorskih sustava.



Slika 8. Ovisnost efikasnosti i temperaturi koje se postižu kod koncentratorskih sustava [11].

Dakle, cilj je postići što veću koncentraciju solarnog zračenja i veće temperature. Međutim, kao radni medij se uglavnom koriste ulja koja na temperaturama preko 400 °C postaju u kemijskom smislu nestabilna pa je to razlog da su se tražili druga sredstva koja bi zadržala svojstva i na višim temperaturama, a koja sredstva bi istovremeno trebala biti i netoksična, odnosno prihvatljiva za okoliš. Upravo to su razlozi razvoja DSG tehnologije koja kao radni medij koristi demineraliziranu vodu.

Za optimalni rad solarnih paraboličnih kolektora ključna su četiri parametra koji određuju veličinu i oblik kolektora: (i) *duljina kolektora*, (ii) *žarišna duljina*, (iii) *širina kolektora* te (iv) *obodni kut*, tj. kut između optičke osi i linije između žarišne točke i zrcalnog ruba (Slika 9).



Slika 9. Parametri koji određuju veličinu i oblik kolektora [9].

Osim navedenih parametara važan parametar solarnih paraboličnih kolektora je *geometrijski omjer koncentracije* ( $C$ ) definiran kao omjer površine kolektora i donje površine apsorpcijske cijevi [12], odnosno:

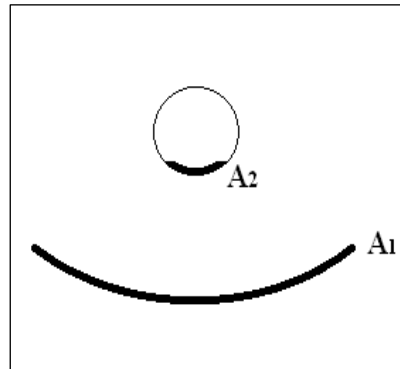
$$C = \frac{A_1}{A_2} \quad (1)$$

gdje je:

$A_1$  - širina kolektora tj. duljina parabole,

$A_2$  - duljina kružnog luka apsorpcijske cijevi na koji se reflektira solarno zračenje.

Veličine  $A_1$  i  $A_2$  prikazane su na Slici 10.



Slika 10. Ilustrativni prikaz veličina  $A_1$  i  $A_2$ .

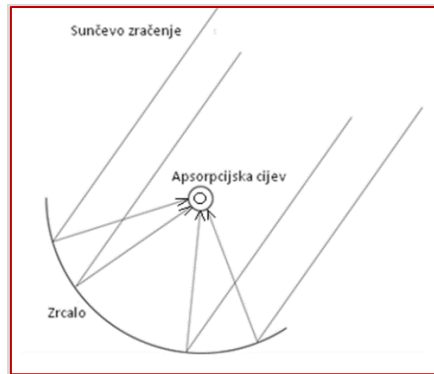
Vrijednosti *geometrijskog omjera koncentracije* mogu dosegnuti i do 5000, dok se već kod koncentracije  $C = 1000$  dobivaju temperature od oko 2400 K. Što je veća temperatura, to je i veći koncentracijski gradijent, odnosno veći je omjer površine paraboličnog kolektora i površine apsorpcijske cijevi. Veći omjer površine paraboličnog kolektora i površine apsorpcijske cijevi omogućava veću količinu koncentriranja solarnog zračenja na apsorpcijsku cijev, a time i veće temperature što u konačnici osigurava veću efikasnost koncentratorskog sustava.

Solarni parabolični kolektori direktno pretvaraju sunčevu energiju u toplinsku energiju. Sastoje se od *paraboličnog zrcala* koji reflektira svjetlost na *apsorpcijsku cijev* kroz koju struji *radni fluid*.

### 2.3.1. Parabolično zrcalo

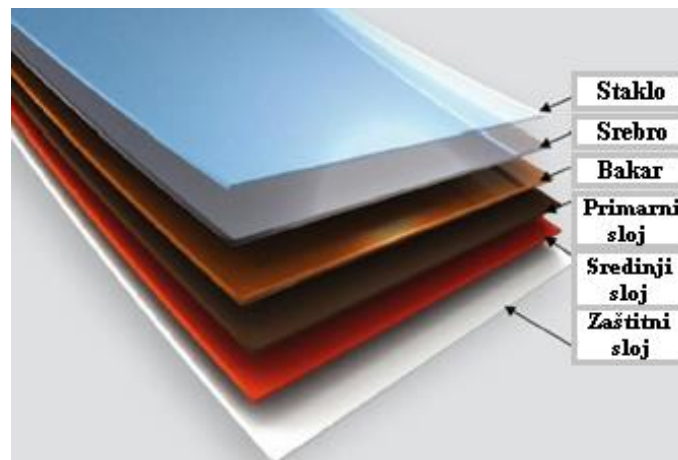
Površina paraboličnog zrcala znatno je veća od površine same apsorpcijske cijevi, što omogućava reflektiranje sunčeve svjetlosti u žarište cijevi kao što je prikazano na Slici 11. Na taj način moguće je zagrijati radni fluid u apsorpcijskoj cijevi na visoke temperature (do 400 °C) [13].





Slika 11. Refleksija sunčevog zračenja u žarišnu točku [14].

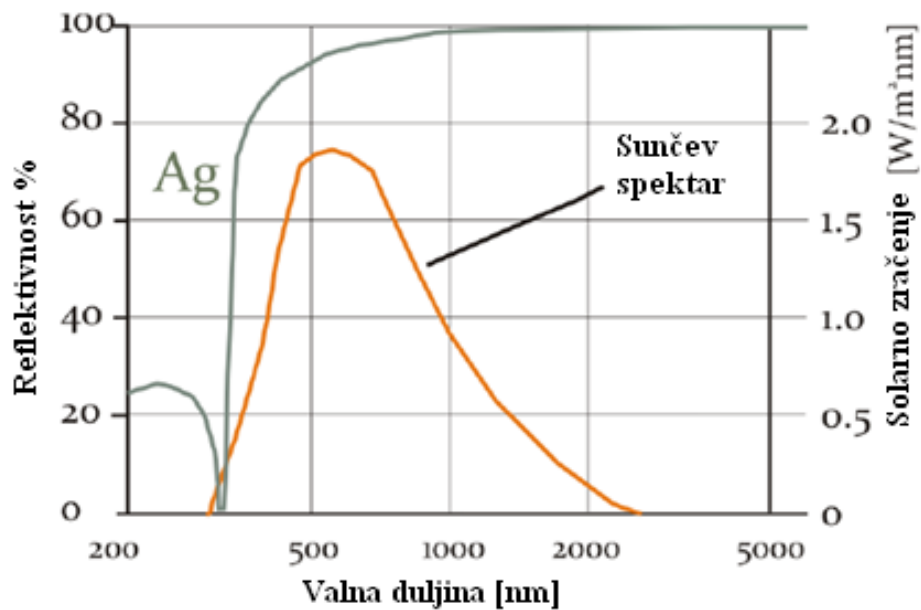
Parabolično zrcalo izrađeno je od više slojeva različitih materijala prikazanih na Slici 12. Prvi sloj ispod staklene površine je reflektirajući sloj - sloj presvučen srebrom. Ispod srebrnog sloja nalazi se zaštitni sloj od bakra ispod kojeg se dodaju tri epoksidna premaza: primarni, srednji te zaštitni gornji sloj epoksidnog premaza. Debljina kompletnog paraboličnog zrcala iznosi 4 do 5 mm [9].



Slika 12. Slojevi paraboličnog zrcala [9].

Staklo za parabolična zrcala najčešće se proizvodi metodom plutajućeg stakla, gdje rastaljeno staklo kontinuirano teče na kupelji tekućeg kositra. Metoda plutajućeg stakla jamči vrlo visoku čistoću proizvedenog stakla. Koristi se staklo s niskim udjelom željeza kako bi se povećao prijenos svjetlosti u solarnom spektru. Nakon što je staklo izrezano na pravu veličinu i brušeno, oblikovano je u parabolični oblik u pećnici.

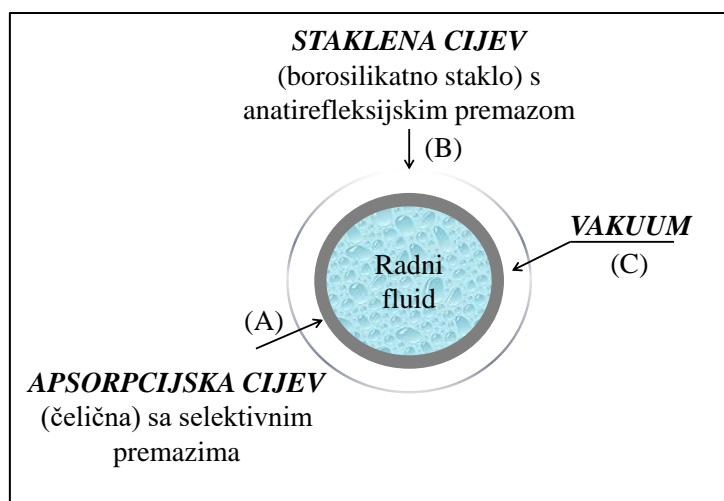
Najvažnije svojstvo materijala za parabolična zrcala je reflektirajuće svojstvo. Refleksivnost mora biti velika kako bi se apsorpcijska cijev mogla zagrijavati. Refleksivnost je različita za različite valne duljine pa prema tome solarna parabolična zrcala moraju biti prilagođena sunčevom spektru. Najčešća parabolična zrcala su staklena zrcala obložena srebrom (pokazuju veliku izdržljivost i male promjene u smanjenju refleksije i nakon više desetaka godina primjene) jer srebro ima visoka refleksivnost u odnosu na Sunčev spektar (Slika 13) [9].



Slika 13. Refleksivnost srebra u odnosu na Sunčev spektar [9].

### 2.3.2. Cijev solarnog paraboličnog kolektora

Apsorpcijska cijev solarnog paraboličnog kolektora sastoji se od čelične cijevi (A) okružene staklenom cijevi (B) u čijem se međuprostoru nalazi vakuum (C). Presjek cijevi prikazan je na Slici 14.



Slika 14. Presjek cijevi solarnog paraboličnog kolektora (K.Margeta).

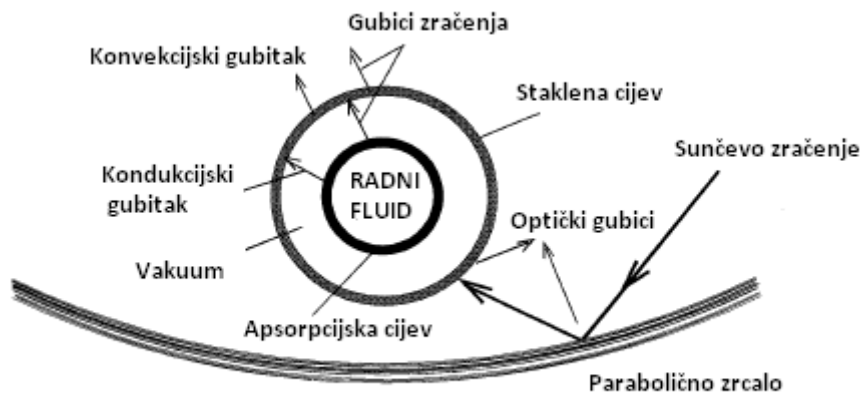
(A) **Apsorpcijska cijev** (čelična) - ima ograničenu apsorpciju pri čemu se određeni dio ulaznog zračenja reflektira na apsorpcijskoj cijevi. Kako bi se postigla visoka apsorpcija i vrlo mali toplinski gubici apsorpcijske cijevi, ona je obložena *selektivnim premazom* koji joj omogućava visoku apsorpciju sunčevog zračenja (>90%) i vrlo nisku emisiju infracrvenog zračenja (<30%). Uporabom selektivnih premaza gubici se smanjuju na oko 5%. Dostupno je više vrsta selektivnih premaza, a odabir samog premaza ovisi o temperaturama koje se žele postići. Za temperature do 290 °C mogu se koristiti premazi na bazi nikla ili bakra. Ukoliko se žele postići više temperature, do 400 °C, koriste se posebni premazi na bazi kermeta (materijal koji se sastoji od metalnih nano-čestica i keramike.) Premaz se sastoji od više slojeva od kojih je prvi, reflektirajući sloj, od metala koji je visoko reflektirajući u infracrvenom području (bakar, aluminij, molbiden). Drugi sloj je načinjen od kermeta koji se može podijeliti na različite slojeve ovisno o većem ili manjem metalnom udjelu.

B) **Staklena cijev** (iznimno čvrsto borosilikatno staklo) - koja se nalazi oko apsorpcijske cijevi sprječava konvekcijske gubitke. Staklena cijev sprječava i protok zraka oko vruće apsorpcijske cijevi koji bi je hladio te na taj način zadržava toplinu apsorpcijske cijevi. Staklo ima prilično nisku transmisiju u infracrvenom području što doprinosi izolacijskom učinku jer zadržava jedan dio emitiranog toplinskog zračenja apsorpcijske cijevi te tako zagrijava staklo što smanjuje konvekcijske gubitak topline i stvara dodatno toplinsko zračenje natrag na apsorpcijsku cijev. Optički gubici vezani su i uz staklenu i uz apsorpcijsku cijev. Staklena cijev ima ograničenu propusnost pa da se jedan dio zračenja reflektira i drugi dio apsorbira.

Uporabom antirefleksijskih premaza i visoko prozirnih staklenih materijali gubici se smanjuju na oko 4%.

C) **Vakuum** – između apsorpcijske cijevi i staklene cijevi nalazi se vakuum koji je izvanredan izolator što doprinosi smanjenju toplinskih gubitaka.

Učinkovitost procesa u DSG tehnologiji ovisi o optičkim i termalnim svojstvima apsorpcijske cijevi solarnog termalnog kolektora. Reflektirano Sunčevo zračenje nastoji se potpuno pretvoriti u toplinu, a optički i toplinski gubici apsorpcijske cijevi solarnog termalnog kolektora trebaju biti minimalni (Slika 15.) [14].



Slika 15. Gubici u cijevi solarnog paraboličnog kolektora [14].

## 2.4. Strujanje radnog fluida kroz horizontalnu cijev kolektora

Kako bi mogli razumjeti proces strujanja kompleksnijih sustava kao što je sustav dvofaznog strujanja kroz horizontalnu cijev kolektora, potrebno je poznavati osnovne značajke strujanja fluida kroz horizontalnu cijev. Strujanjem zovemo gibanje plina ili tekućine kao posljedice sila koje na njih djeluju.

Prvi znanstvenik/inovator koji je opisao različite oblike strujanja (1883. godine) bio je Osborne Reynolds (Irska). U svojem eksperimentu ugradio je tanku kapilaru u sredinu ravne cijevi u koju je utjecala voda iz spremnika u kojem se održavala konstantna razina kapljevine. Kroz tanku kapilaru propuštao je tanki mlaz obojene kapljevine (bojila). Kod malih brzina strujanja nije došlo do miješanja između slojeva (vode i bojila), te je zaključio da se čestice fluida gibaju pravocrtno. Takvo strujanje nazvao je *laminarno strujanje*. Povećanjem brzine dolazi do djelomičnog miješanja (prijelazno strujanje), a pri velikim brzinama strujanja

dolazi do potpunog miješanja slojeva, odnosno do pojave vrtloženja. Takvo strujanje nazvao je *turbulentno strujanje*.

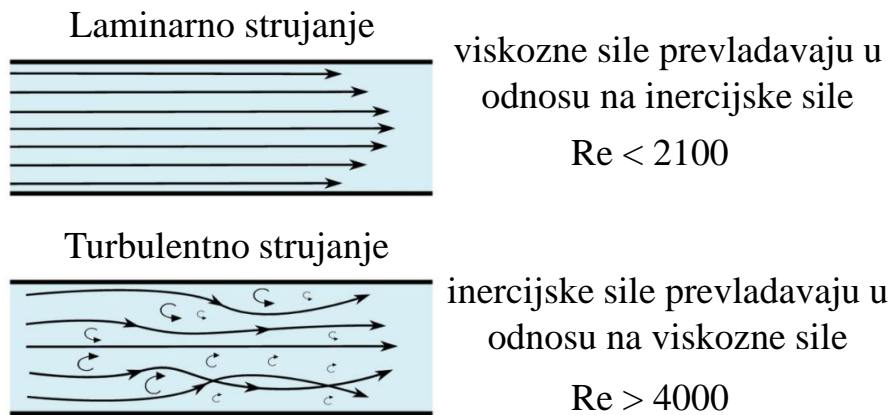
Reynolds je zaključio da brzina nije jedini parametar koji utječe na vrstu strujanja te da se veličine koje utječu na strujanje mogu opisati kao omjer viskoznih i interakcijskih sila u fluidu. Ova veličina naziva se Reynolds-ov broj [15] te se računa kao:

$$Re = \frac{\rho * V * l}{\mu} \quad (2)$$

gdje je:

- $\rho$  – gustoća fluida
- $V$  - brzina
- $L$  – dužina cijevi
- $\mu$  - dinamička viskoznost

Dakle, postoje dva osnovna oblika strujanja fluida, *laminarno* i *turbulentno*, definirana Reynolds-ovim brojem (Slika 16.) .



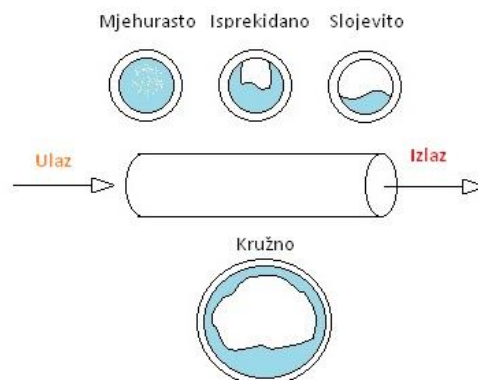
Slika 16. Prikaz profila laminarnog i turbulentnog strujanja [16].

U Tablici 3. dane su karakteristike laminarnog i turbulentnog strujanja. Prelazak iz laminarnog u turbulentno strujanje naziva se prijelazno stanje te odgovara vrijednostima  $2100 < Re < 4000$ .

Tablica 3. Karakteristike laminarnog i turbulentnog strujanja [17].





LAMINARNO STRUJANJE	TURBULENTNO STRUJANJE
Stabilnost strujanja	Nestabilnost strujanja
Linearnost strujanja	Nelinearnost strujanja
Ne postojanost vrtloga	Vrtloženje
Niski koeficijent prijelaza topline	Veliki koeficijent prijelaza topline
Mali koeficijent otpora trenja	Veliki koeficijent otpora trenja
Separacija pri manjim gradijentima tlaka	Separacija pri većim gradijentima tlaka

Za razliku od jednofaznog strujanja, dvofazno strujanje (plinovita i tekuća faza) kroz horizontalnu cijev predstavlja znatno kompleksniji proces iz razloga što plinovita faza struji brže od tekuće faze. Zbog različite brzine strujanja dviju faza dolazi do nejednakosti u količinama faza koje struje i koje se zadržavaju po presjeku cijevi. Ovisno o tome koliki je protok plinske faze, formira se različit oblik površina između faza. Prilikom dvofaznog strujanja kroz horizontalnu cijev, pad tlaka uslijed trenja veći je od pada tlaka kod jednofaznog strujanja, kao i od pada tlaka koji je izračunat s prosječnim fizičkim svojstvima smjese kapljevina – plin. Iz razloga što plinska faza struji brže od kapljevite faze, za različite omjere protoka plinske i kapljevite faze, dolazi do formiranja različitih oblika horizontalnog dvofaznog strujanja, koji imaju i različite padove tlaka. Na Slici 17. prikazana su četiri oblika dvofaznog strujanja u horizontalnoj cijevi s obzirom na povećanje brzine strujanja plinske faze, dok su karakteristike svaka četiri oblika strujanja dane u Tablici 4., [18].



Slika 17. Oblici dvofaznog strujanja u horizontalnoj cijevi s obzirom na povećanje brzine strujanja plinske faze.

Tablica 4. Karakteristike oblika dvofaznog strujanja kroz horizontalnu cijev [19].

VRSTA STRUJANJA		KARAKTERISTIKE STRUJANJA
Mjehurasto		<ul style="list-style-type: none"> <li>- manji volumni udio plinovite od kapljevite faze</li> <li>- plin raspršen unutar kapljevine</li> </ul>
Isprekidano		<ul style="list-style-type: none"> <li>- plinovita faza brže se kreće od kapljevite</li> </ul>
Slojevito		<ul style="list-style-type: none"> <li>- izrazito male brzine strujanja</li> <li>- svaka faza struji svojim dijelom cijevi</li> </ul>
Kružno		<ul style="list-style-type: none"> <li>- prstenasto kruženje tekućine unutar koje je raspršen plin</li> <li>- NAJPOGODNIJI OBLIK!</li> </ul>

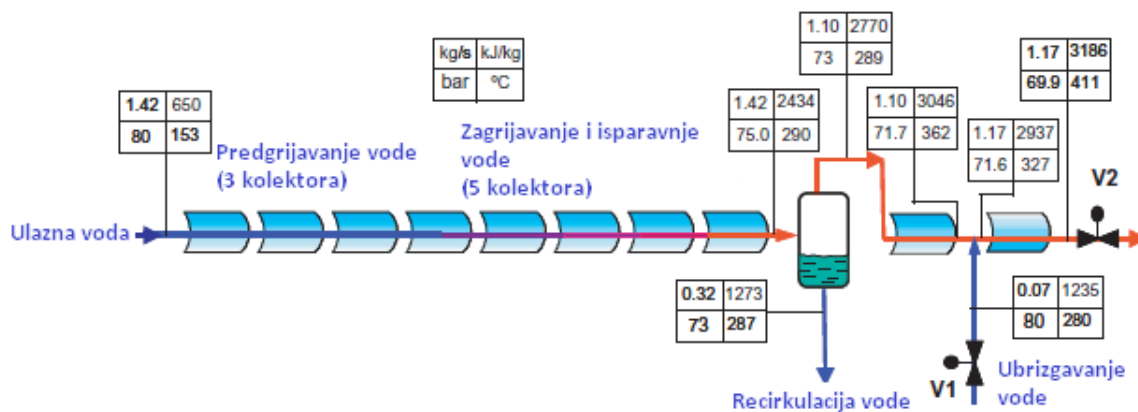
Prilikom dvofaznog strujanja strujanja kroz horizontalnu cijev dolazi do prijenosa topline uslijed zagrijavanja cijevi. Koeficijent karakterističan za prijenos topline uslijed zagrijavanja cijevi na radni fluid, naziva se koeficijent prijenosa topline  $\alpha$  ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) [20]. Prema tome, koeficijent prijenosa topline direktno ovisi o vrsti strujanja unutar horizontalne cijevi.

Iz priloženih slika u tablici 4., može se vidjeti kako je kapljevita faza prilikom određenih vrsta strujanja u dodiru sa samo jednim dijelom unutarnje površine cijevi dok u nekim slučajevima vlaži cijelu unutarnju površinu cijevi. Koeficijent prijelaza topline između cijevi i kapljevine veći je u odnosu na koeficijent prijelaza topline između cijevi i pare [19]. Iz tog razloga je koeficijent prijenosa topline kod mjehurastog i isprekidanog strujanja dobar dok kod slojevitog strujanja dolazi do odvajanja parne i kapljevite faze što rezultira neujednačenim koeficijentom prijenosa topline. To može rezultirati velikom temperaturnom razlikom između donjeg i gornjeg dijela cijevi, čak preko 100 °C, što za posljedicu može uzrokovati termičko naprezanje i savijanje cijevi. Prema tome, da ne dođe do uništenja same cijevi slojevito strujanje želi se izbjeći. Prilikom kružnog strujanja, tekuća faza struji cijelom dužinom uz stjenke cijevi stvarajući prsten unutar kojeg struji para. Stjenka apsorpcijske cijevi je navlažena cijelom dužinom što osigurava dobar koeficijent prijenosa topline unutar

cijele cijevi. Na taj način izbjegnuto je termičko naprezanje. Cilj je postići kružnu vrstu strujanja gdje je omjer tekuće i parne faze 50:50.

## 2.5. Princip rada DSG paraboličnog kolektorskog sustava

Parabolični kolektorski sustav sastoji se od ukupno deset kolektora: 3 kolektora za *predgrijavanje vode*, 5 kolektora za *zagrijavanje i isparavanje vode* te su dodatna 2 kolektora za *pregrijavanje pare*. Između zadnjeg kolektora za isparavanje vode i prvog kolektora za pregrijavanje pare nalazi se *visokotlačni separator* u kojem se razdvajaju vodena i parna faza. Tekuća se voda iz separatora može ponovno vratiti u sustav pomoću recirkulacijske pumpe (Slika 18.) [22].



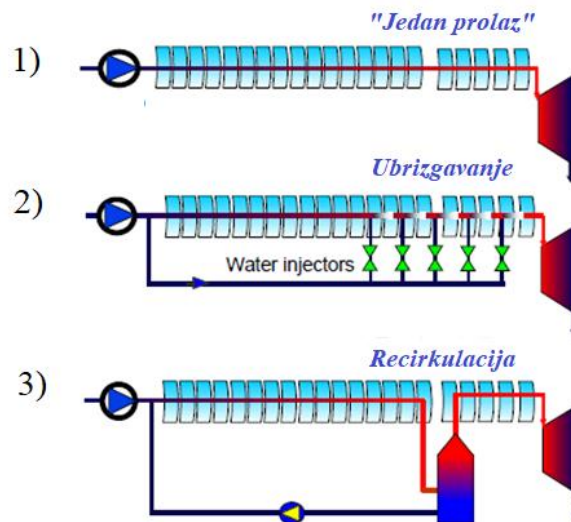
Slika 18. Princip rada DSG kolektorskog sustava [21].

Kako se iz Slike 18. vidi, temperatura demineralizirane vode na ulazu u kolektorski sustav je 153 °C pri tlaku od 80 bara, dok je temperatura na ulazu u visokotlačni separator 290 °C. Para nakon prolaska kroz kolektore za pregrijavanje, dostiže temperaturu do 411 °C pri 69.9 bara.

Temperatura pregrijane pare proizvedene u svakom redu kolektorskog sustava kontrolira se pomoću mlaznice za ubrizgavanje vode postavljene na ulazu posljednjeg kolektora. Ovako opisan kolektorski sustav sa deset kolektora predstavlja jedan red, ali moguće je i više paralelnih redova.

Problem taloženja unutar apsorpcijske cijevi uzrokovan tehničkim problemima može se izbjeći na tri načina koji su prikazani na slici 19., [22].





Slika 19. Tri operacijska koncepta DSG tehnologije [22].

1) **Proces „Jedan prolaz“** - kod ovog procesa veliki temperaturni gradijenti mogu se izbjeći naginjanjem kolektora pod određenim kutom. Ulazna se voda prolaskom kroz sustav solarnih kolektora najprije predgrijava, zatim isparava te prelazi u pregrijanu paru. Glavna prednost ovakvog procesa je njegoa jednostavnost, međutim mana je što zahtijeva veliku kontrolu pregrijane pare na izlazu.

2) **Proces ubrizgavanja** - u ovom procesu ubrizgavaju se male količine vode unutar reda kolektorskog sustava, između samih kolektora. Konstantno injektiranje vode između kolektora osigurava zadržavanje određene količine vode iznad granične vrijednosti kako ne bi došlo do velikog temperaturnog gradijenta. Na taj način se može lako kontrolirati pregrijana para na izlazu, ali je proces kompleksniji i iziskuje veće troškove.

3) **Proces recirkulacije** – u ovom procesu koristi se separator postavljen na kraju kolektora za isparavanje. Količina ulazne vode je mnogo veća od količine pare koja nastaje u procesu. Prolaskom vode kroz cijevi kolektora za zagrijavanje, dio vode se pretvara u paru. Para se dalje separira u separatoru, dok se preostala voda pumpa nazad na ulaz u kolektorski sustav pomoću recirkulacijske pumpe. Ovakav proces se može dobro kontrolirati, međutim recirkulacijska pumpa predstavlja određena opterećenja sustavu i iziskuje dodatne troškove. Prednosti i nedostaci pojedinog procesa navedeni su u Tablici 3., [22].

Tablica 5. Prednosti i nedostaci operacijskog koncepta procesa: „Jedan prolaz“, Ubrizgavanja i Recirkulacije.

Operacijski koncept	Prednosti	Nedostaci
„Jedan prolaz“	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visok protok vode</li> <li>- najniži troškovi</li> <li>- jednostavan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- manja kontrola procesa</li> </ul>
Ubrizgavanje	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bolja kontrola procesa</li> <li>- stabilnost protoka</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kompleksnost</li> <li>- veliki troškovi</li> </ul>
Recirkulacija	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kontrola procesa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kompleksnost</li> <li>- veća opterećenja</li> </ul>

## 2.6. Znanstveni i tehnološki iskorak Seawater Steam Engine tehnologije

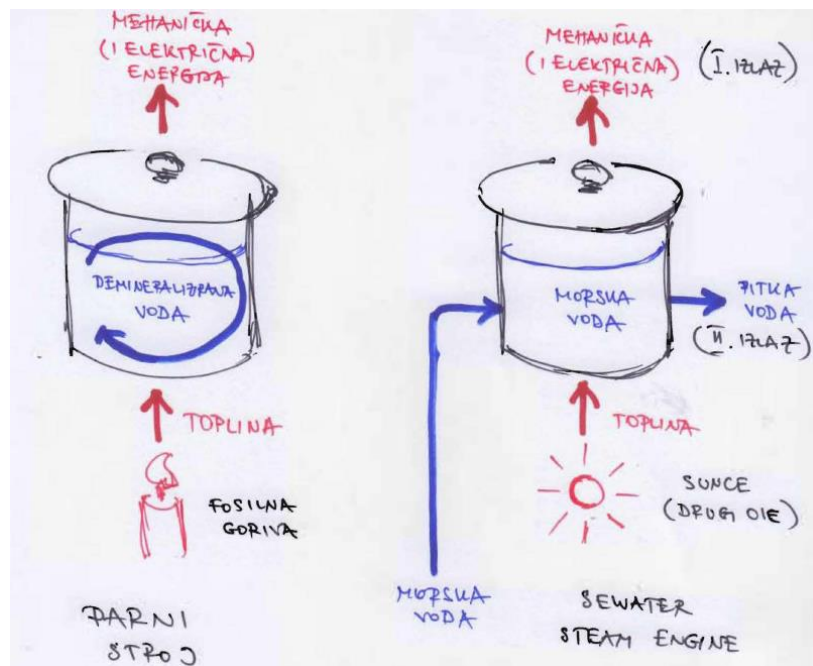
U čemu se zapravo sastoji radikalnost inovacije *Seawater Steam Engine* tehnologije? Jednostavan odgovor je da se u DSG sustavu umjesto demineralizirane vode koristi morska voda kod fizikalno kemijskih uvjeta kod kojih se do sada nije koristila (temperatura do 400 °C i tlak od 80 bara – do sada postoje podaci o termofizičkim svojstvima morske vode na temperaturama do 200 °C [4], što predstavlja inženjerski princip, a također govori i o znanstvenom principu čije objašnjenje naravno prelazi okvire ovog rada. Dakle, implikacije „samo“ te „zamjene demineralizirane vode s morskom vodom“ vode u radikalno novu tehnologiju.

Naime, *solarni parabolični kolektori su u osnovi generatori pare* koja se koristi za proizvodnju, najprije mehaničke energije na turbinama, a onda i električne energije u generatorima. S druge strane, para na izlazu iz turbina kondenzira se u destiliranu vodu koja se tehnologijom obrade voda može dovesti do pitke vode, tako da ta nova tehnologija za jedan ulaz (solarnu energiju) daje dva izlaza: električnu energiju i pitku vodu, a što novoj tehnologiji daje potpuno novu kvalitetu, odnosno daje joj taj snažan iskorak/proboj (*engl. breakthrough*).

Dakle, postoje tehnologije koje koriste obnovljive izvore energije da bi proizvele električnu (i/ili toplinsku) energiju na svojem izlazu i postoje tehnologije koje koriste obnovljive izvore energije da bi se iz morske vode dobila pitka voda (tehnologije

desalinacije), ali do kreiranja SSE tehnologije nije postojala tehnologija koja bi mogla na svojem izlazu istovremeno proizvoditi i električnu energiju i pitku vodu i to na način da morska voda bude radni fluid u sustavu. Dakle, ne kao kod postojećih tehnologija kod kojih se, poput kogeneracije, koristi otpadna toplina za sustave desalinacije. Između tih tehnologija je velika razlika jer se s korištenjem morske vode kao radnog medija može značajno povećati efikasnost sustava i pojednostaviti sustav, a što bi moglo imati za posljedicu i povećanje pouzdanosti takvog sustava koja je izuzetno važna kategorija jer se radi o tome da se održiva zajednica ne smije ostaviti niti bez pitke vode, a niti bez energije.

Nadalje, da bi neka tehnologija uistinu bila i radikalno nova tehnologija, nužno ju je usporediti i s najslučnijom postojećom tehnologijom. U tom smislu, SSE tehnologiju je najbolje usporediti s parnim strojem (Slika 20.).



Slika 20. Skica inovativnog iskoraka (breakthrough-a) SSE tehnologije –  
– usporedba s parnim strojem (Z. Glasnović).

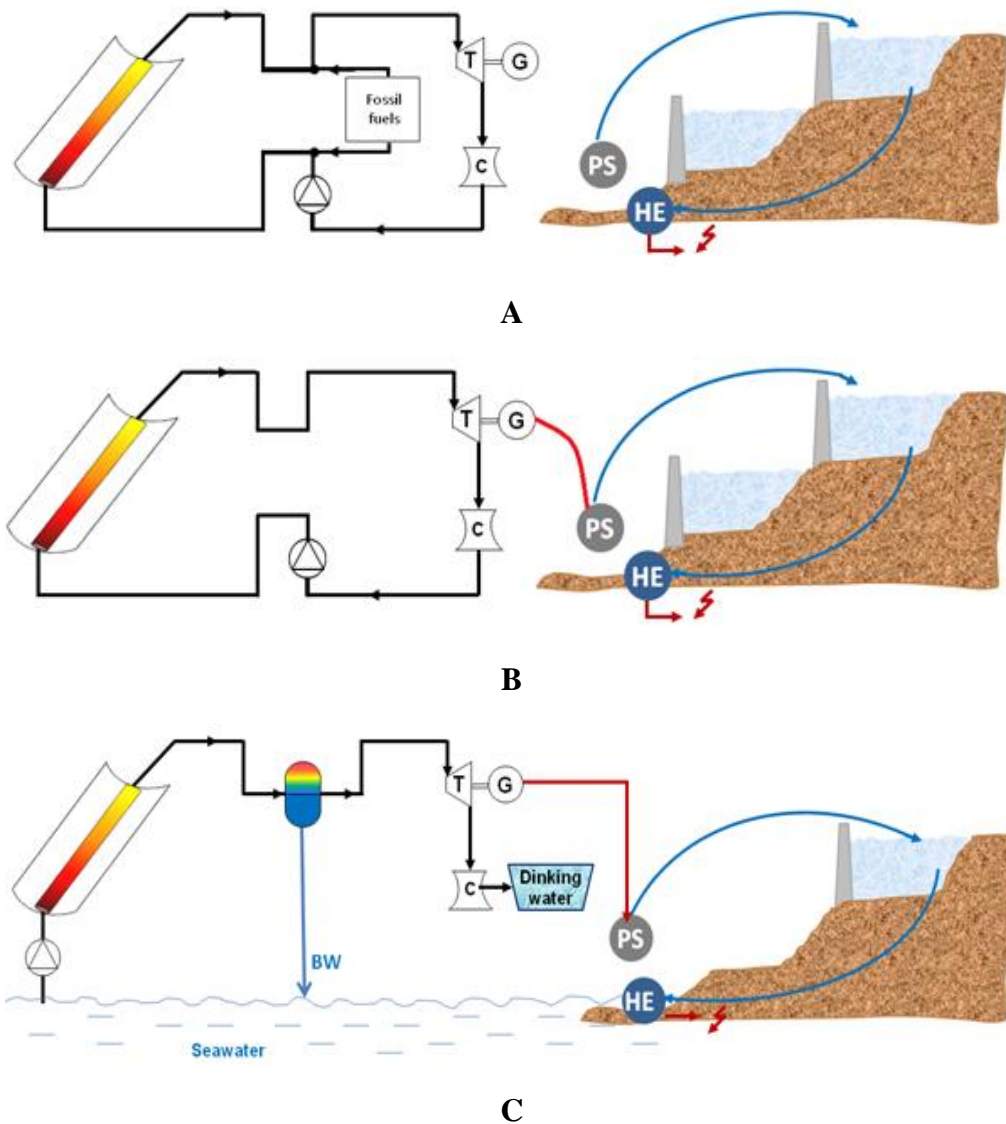
Iz Slike 20. se vidi da se i kod parnog stroja i kod SSE tehnologije ulazna toplinska energija, zagrijavanjem radnog medija (kod parnog stroja je to demineralizirana voda, a kod SSE tehnologije je to morska voda) pretvara u mehaničku energiju, a ona u električnu energiju.

Također, vidljivo je i kako kod parnog stroja postoji samo jedan ulaz (energija iz fosilnih goriva) i jedan izlaz (mehanička i električna energija), pri čemu radni medij

(demineralizirana voda) cirkulira u zatvorenom krugu; dok se kod SSE tehnologije iz *jednog ulaza* (energije Sunca ili drugih obnovljivih izvora energije) dobivaju *dva izlaza* (mehanička i električna energija kao jedan izlaz i destilirana, odnosno pitka voda, kao drugi izlaz), pri čemu morska voda kao radni medij struji kroz sustav, separirajući se pri tome u dvije faze, odnosno parnu fazu i tekuću fazu predstavljenu koncentriranom morskom vodom. Dakle, kod SSE tehnologije se radi o otvorenom termodinamičkom sustavu u kojem dolazi od izmjene tvari (vode) i energije s okolinom.

## 2.7. Tehnološki koncept *Seawater Steam Engine* tehnologije

Tijek razvoja i tehnološki koncept Seawater Stem Engine tehnologije prikazan je na Slici 21.



Slika 21. Razvoj koji je doveo do SSE tehnologije (K. Margeta).

Slici 21. A. se vide tijek razvoja koja su dovela do *Seawater Stem Engine* tehnologije. Na prvoj slici se vidi standardna DSG tehnologija koja nije „čista“, a niti potpuno „zelena tehnologija“ jer u vrijeme kad nema solarnog zračenja koristi fosilna goriva.

Na Slici 21. B. se vide inovativna rješenja (patenti Z. Glasnović i J. Margeta, [23,24,25]) kojima se riješio problem da se uz solarne elektrane koriste fosilna goriva za periode kad nema dovoljno solarnog zračenja te su na taj način solarni sustavi postali izvori, isključivo „zelene energije“.

Na Slici 21. C. dan je pojednostavljeni prikaz SSE tehnologije. Morska voda se dovodi direktno u kolektorski sustav u kojem se zagrijava i koji generira paru. Ta se parna faza odvaja od tekuće faze koncentrirane morske vode u visokotlačnom separatoru, nakon čega se dovodi do turbina, na čijoj osovini su i generatori koji proizvode električnu energiju. Para se nakon turbina hladi i pretvara u destiliranu, nakon čije obrade se dobiva pitka voda.

**Reverzibilna hidroelektrana** (PSH sustav) se koristi da bi se ujednačili ljetni viškovi i zimski manjkovi solarne energije i postigla kontinuirana proizvodnja energije, dok se i pitka voda skladišti u bazenima kako bi se osigurao i kontinuitet napajanja pitkom vodom.

## 2.8. Proračuni proizvodnje toplinske i električne energije iz SSE tehnologije

Prvi korak u planiranju SSE sustava je njegovo dimenzioniranje ili određivanje nominalne snage SSE generatora  $P_{el(NOM)}$ . Međutim, obzirom da su sve klimatološke veličine (uključujući i solarno zračenje) koje utječu na veličinu tog generatora, kao i potrošnja energije i pitke vode od strane nekog konzuma, zapravo stohastičke, te da su funkcija cilja i ograničenja nelinearni; dimenzioniranje SSE sustava je u osnovi izuzetno težak zadatak. Ipak, taj je problem riješen u radu „*Could Key Engine, as a new open-source for RES technology development, start the third industrial revolution?*“ [26] (*Key Engine = Seawater Steam Engine*) na način da je razvijen simulacijsko-optimizacijski matematički model koji počiva na dinamičkom programiranju, a koja metoda se i inače smatra najteže shvatljivom znanstvenom metodom na svijetu, pogotovo u slučaju kompleksnih funkcija cilja (konkretno, MIN-MAX). Upravo ta je metoda korištena za dimenzioniranje snage SSE sustava za lokaciju Visa [26] pa je stoga logično rezultate iz tog primjera koristiti kao model za proračune nominalne snage SSE generatora i na drugim lokacijama u svijetu.

Zašto je važno najprije odrediti nominalnu snagu? Zato što ona determinira veličinu (površinu) kolektorskog polja  $A_{coll}$ , a ta površina onda determinira količinu toplinske energije koju solarni parabolični kolektori mogu proizvesti.

Tijek proračuna preuzet je iz rada „*A model for optimal sizing of solar thermal hydroelectric power plant*“ [27].

Ukupna količina električne energije  $E_{el}$  dobivene iz toplinske energije  $\bar{Q}$  [J/m<sup>2</sup>] solarnog paraboličnog kolektorskog sustava, ako se uzme učinkovitost pretvorbe toplinske energije u električnu energiju  $\bar{\eta}_{Q-El} = 0.35$  i površina kolektorskog sustava  $A_{coll}$ , računa se iz jednadžbe:

$$E_{(ST)} = \bar{\eta}_{Q-EL} \cdot f_m \cdot A_{coll} \cdot \bar{Q} \quad (3)$$

gdje je:  $f_m$  faktor prilagođenja tereta karakteristikama generatora.

Prikupljena energija u solarnim paraboličnim kolektorima produkt je faktora učinkovitosti odvođenja topline  $F$  (broj jednak 1 ako izračun za količinu prikupljene solarne energije uključuje radnu temperaturu površine kolektorskog zrcala od 360 °C), prosječne optičke učinkovitosti kolektora  $\bar{\eta}_{opt}$ , faktora iskorištenja solarne energije

$\bar{\Phi}$  temeljenom na Hottel-Whillier konceptu i prosječne dnevne vrijednosti prikupljene Sunčeve energije  $E_{S(coll)}$  [J/m<sup>2</sup>/dan]:

$$\bar{Q} = F \cdot \bar{\eta}_{opt} \cdot \bar{\Phi} \cdot E_{S(coll)} \quad (4)$$

Solarni parabolični kolektori prikupljaju samo komponentu direktnog solarnog zračenja. Međutim, ukoliko ne postoje podaci o direktnom solarnom zračenju, energija koju prikuplja solarni parabolični kolektor izračunava se kao razlika između globalnog i difuznog zračenja, prema:

$$E_{S(coll)} = R_h E_{S(h)} - R_d E_{S(d)} = \left[ R_h - R_d \left( \frac{E_{S(d)}}{E_{S(h)}} \right) \right] \cdot E_{S(h)} = R_{coll} \cdot E_S \quad (5)$$

gdje je:  $E_{S(h)}$  prosječna dnevno globalno zračenje na horizontalnu površinu [Jm<sup>-2</sup>],  $E_{S(d)}$  prosječno dnevno difuzno zračenje na horizontalnu površinu [Jm<sup>-2</sup>],  $R_h$  vremenski integral globalnog zračenja;  $R_d$  vremenski integral difuznog zračenja, a  $R_{coll}$  je omjer prosječnog dnevnog prikupljenog zračenja nagnute plohe solarnih paraboličnih kolektora i horizontalne plohe.

Uvrštavanjem jednadžbe (4) u jednadžbu (3) dobiva se prosječna proizvedena električna energija po danu iz solarne elektrane [J/dan]:

$$E_{el(ST)} = \eta_{Q-EL} \cdot f_m \cdot A_{coll} \cdot F \cdot \bar{\eta}_{opt} \cdot \bar{\Phi} \cdot E_{S(coll)} \quad (6)$$

što je za jediničnu vrijednost površine aperture kolektora: [J/m<sup>2</sup>/dan]:

$$E_{el(ST)} = \eta_{Q-EL} \cdot f_m \cdot F \cdot \bar{\eta}_{opt} \cdot \bar{\Phi} \cdot E_{S(coll)} \quad (7)$$

Dugoročni prosječni faktor iskorištenja solarne energije je nelinearna funkcija indeksa jasnoće  $K_h$  i kritičnog omjera  $X$ . Izraz, valjan za praćenje paraboličnih kolektora prema Collares-Pereira i Rabl (1979.), je sljedeći:

$$\bar{\Phi} = 1 - (0,049 + 1,44K_h)X + 0,341K_h X^2 \quad (8)$$

Za nekoliko ljetnih dana u godini bez naoblake gdje je  $K_h > 0,75$ , vrijedi:

$$\bar{\Phi} = 1 - X \quad (9)$$

dok se kritični omjer energije računa se prema:

$$X = \frac{\bar{q}_u}{\bar{\eta}_{opt} E_{S(coll)}} \quad (10)$$

gdje je:  $\bar{q}_u$  gubitak topline s površine kolektorske cijevi [J /m<sup>2</sup> /dan],  $\bar{\eta}_{opt}$  dugoročni prosjek učinkovitosti optičkih kolektora i  $E_{S(coll)}$  je prosječno prikupljena solarna energija po danu [J/m<sup>2</sup>/dan].

Gubitak energije s površine kolektorske cijevi, izražen po jedinici površine njezina otvora, je:

$$\bar{q}_u = 2t_c U (T_{coll} - T_a) \quad (11)$$

gdje:  $t_c$  predstavlja vrijeme kada kolektori ne rade,  $U$  je koeficijent prijenosa topline [W/m<sup>2</sup>K],  $T_{coll}$  predstavlja temperaturu površine cijevi kolektora, a  $T_a$  temperaturu okoline. Koeficijent prijenosa topline može se iskazati kao:

$$U = a(T_{coll} - T_a)^b \quad (12)$$

gdje  $a$  i  $b$  su koeficijenti tipični za određenu vrstu kolektora. Uvrštavanjem jednadžbe (12) u jednadžbu (11) konačno se dobiva gubitak topline s površine kolektorske cijevi:

$$\bar{q}_u = 2t_c a (T_{coll} - T_a)^b \quad (13)$$



## 2.9. Proračuni proizvodnje pitke vode

Proračuni proizvedene pitke vode, može se prema radu „*Could Key Engine, as a new open-source for RES technology development, start the third industrial revolution?*“ [26] računati iz formule:

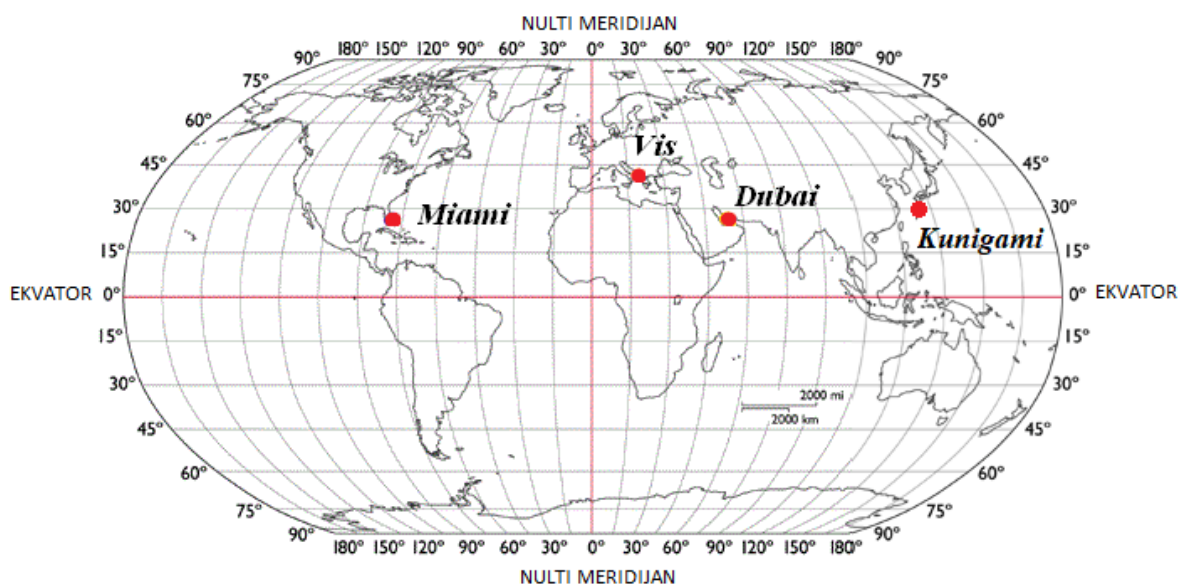
$$V_{DW} = \frac{1}{\rho_{H_2O}} \cdot \frac{P_{el(NOM)}}{\eta_{ME} \cdot \eta_{TUR} \cdot \Delta h} \sum_{i=1}^N f_{t-DIR(i)} \cdot T_{S(i)} \quad (14)$$

gdje je:  $P_{el(NOM)}$  vrijednost optimalne nominalne snage solarnog generatora,  $\eta_{ME}$  učinkovitost pretvorbe mehaničke energije turbine u električnu energiju generatora,  $\eta_{TUR}$  predstavlja učinkovitost turbine,  $\Delta h$  razlika entalpije pare na ulazu i izlazu turbine,  $f_{t-DIR(i)}$  je faktor koji predstavlja udio sati direktnog Sučevog zračenja u odnosu na trajanje ukupnog izlaganja Suncu (npr. za geografsku širinu na 43° N  $f_{t-DIR(i)}$  je otprilike 75%),  $T_{S(i)}$  vrijeme izlaganja Suncu,  $(i)$  predstavlja vremenski korak, a  $N$  ukupan broj tih vremenskih koraka (npr. za odabrani vremenski korak od jednog dana,  $N = 365$ ).

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1. Studije slučaja

U svrhu provjere primjene SSE tehnologije na različitim lokacijama u svijetu, odabrane su četiri lokacije, odnosno četiri grada i to: Miami (Florida, Sjedinjene Američke Države), Vis (Hrvatska), Dubai (Ujedinjeni Arapski Emirati) i Kunigami (Okinawa, Japan). Geografski smještaj i širine pojedine lokacije prikazani su na Slici 22.



Slika 22. Geografske širine Visa, Miamia, Dubaia, Kunigamia [28].

Iz Slike 22. vidljivo je kako tri od četiri lokacije imaju relativno sličnu geografsku širinu (razlike unutar  $1^\circ$ ). Položaj Visa je nešto sjeverniji u odnosu na ostale gradove, na sjevernoj geografskoj širini  $43^\circ 03' 34.50''$ . Miami se nalazi na sjevernoj geografskoj širini  $25^\circ 45' 42.0516''$ , Dubai na  $25^\circ 16' 37.1532''$  i Kunigami na  $26^\circ 44' 45''$ .

Iako se lokacije ne razlikuju po geografskoj širini, svaki grad ima različitu klimu. Miami ima tropsku klimu, Vis mediteransku, Dubai pustinjsku, a Kunigami subtropsku klimu. S obzirom na različite klime, očito je i da je solarno zračenje za svaki grad drugačije pa se time očekuju i različiti rezultati u smislu proizvodnje električne energije i pitke vode.

### 3.2. Ulazni klimatološki podaci

Ulazni podaci za sve četiri odabrane lokacije, odnosno: Miami, Vis, Dubai i Kunigami, dobiveni su iz programa Meteonorm 7.2.4 (04/05/2018) [29], pri čemu su za Vis uzeti podaci Split/Marjan, a za Kunigami podaci za grad Naha, kao najbliže lokacije jer za lokacije Visa i Kunigamija nema podataka.

Za potrebe ovog rada, promatran je dominantan klimatološki parametar, a to je solarno zračenje i to komponenta direktnog solarnog zračenja ( $B_n$ ), kao najznačajnija za koncentratorske sustave koji prate Sunce (kakav sustav su i parabolični solarni kolektori), zatim globalno Sunčevo zračenje ( $G_h$ ) i difuzno horizontalno zračenje ( $D_h$ ).

Općenito vrijedi odnos:

$$G_h = D_h + B_n \cdot \sin(\alpha) \quad (22)$$

gdje je  $\alpha$  visina Sunca (iznad horizonta).

Ono što u jed. (22) stvara zabunu je da se čini da je globalno solarno zračenje na horizontalnu plohu i najveće. Međutim, činjenica je da su vrijednosti direktnog solarnog zračenja u pravilu veće od globalnog zračenja. Naime, za vrijeme Sunčanih dana (bez oblaka) direktno solarno zračenje je veće (ili jednako) globalnom solarnom zračenju. Naravno, komponenta direktnog solarnog zračenja na horizontalnu plohu (dakle, razlika je u odnosu na onu plohu koja prati Sunce) je manja od globalnog solarnog zračenja jer ono upada na horizontalnu plohu pod kutom. Direktna komponenta je manja i zato što u globalno solarno zračenje ulazi i difuzno zračenje.

No, ako se promatra direktno solarno zračenje na plohu koja prati Sunce, a kakvu plohu predstavljaju parabolični solarni kolektori, onda je ono veće od globalnog solarnog zračenja. Naravno, ako je lokacija blizu ekvatora i Sunce je blizu zenita, globalno zračenje će biti veće od direktnog.

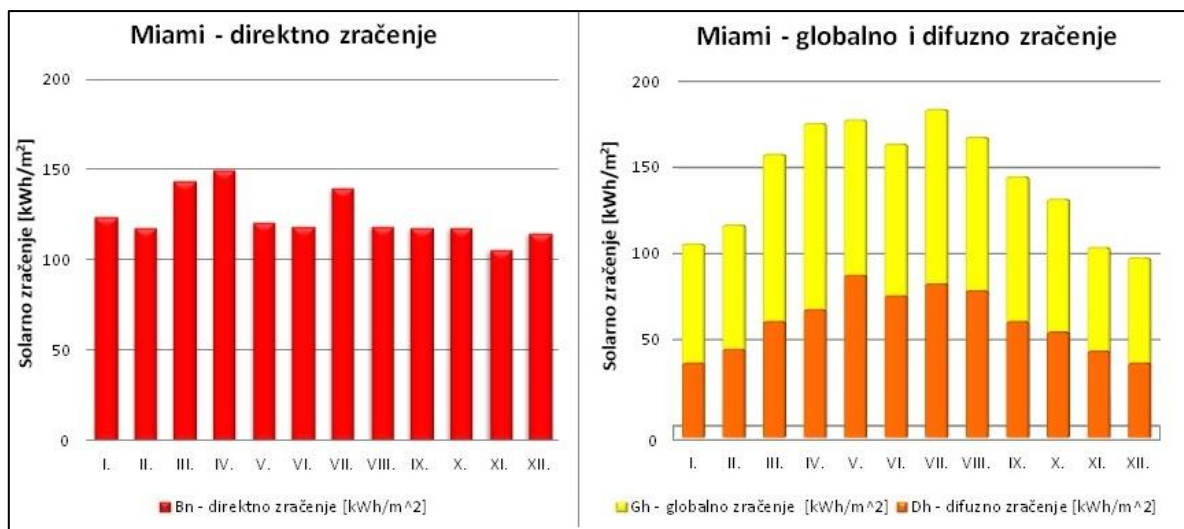
Dakle, direktno solarno zračenje može biti veće od globalnog solarnog zračenja u određenim periodima (npr. ujutro ili popodne) jer u tim periodima ta površina koja je okrenuta prema Suncu prikuplja više zračenja, nego horizontalna ploha. To znači da su godišnje vrijednosti direktnog solarnog zračenja na plohu koja prati Sunce (što je slučaj kod koncentratorskih sustava) veće od vrijednosti globalnog zračenja, što povećava primjenu

koncentratorskih sustava i na lokacijama s manjim vrijednostima globalnog zračenja, odnosno manjim učešćem difuznog zračenja.

U Tablicama 6, 7, 8 i 9. su prikazane vrijednosti solarnog zračenja za Miami, Vis, Dubai i Kunigami respektivno, a na Slikama 23, 24, 25 i 26. su dane vrijednosti direktnog te globalnog i difuznog solarnog zračenja za sve navedene lokacije.

Tablica 6. Vrijednosti solarnog zračenja po mjesecima u godini za grad Miami [29].

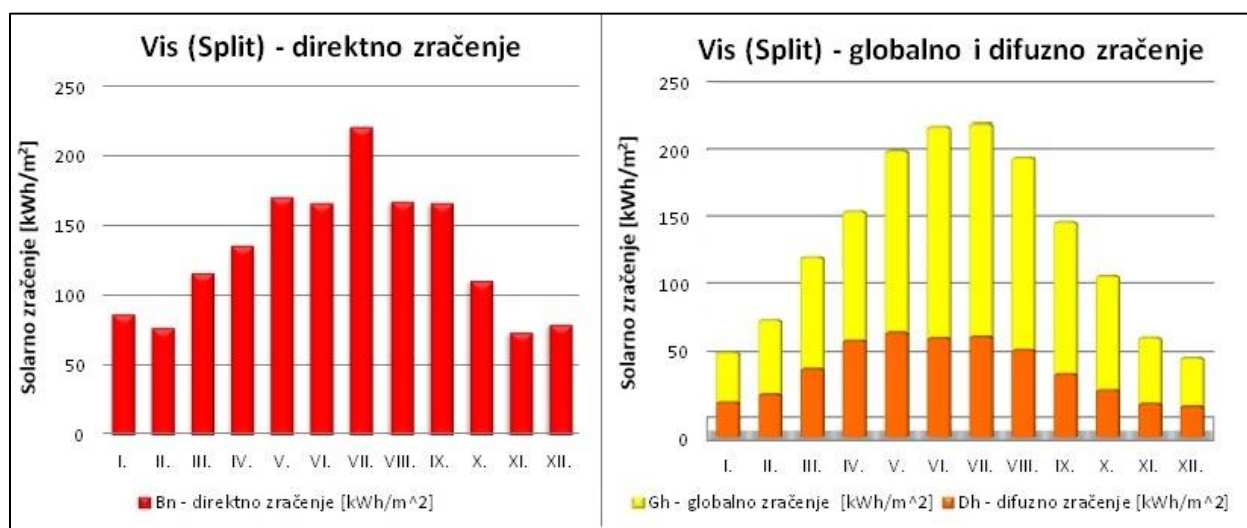
Mjeseci	Globalno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Difuzno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Direktno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Učešće difuznog zračenja (%)
Siječanj	108	43	124	46
Veljača	119	51	118	49
Ožujak	160	67	144	45
Travanj	178	74	150	45
Svibanj	180	94	121	41
Lipanj	166	82	119	43
Srpanj	186	89	140	34
Kolovoz	170	85	119	42
Rujan	147	67	118	35
Listopad	134	61	118	45
Studeni	106	50	106	51
Prosinac	100	43	115	47
<b>Ukupno</b>	<b>1752</b>	<b>808</b>	<b>1491</b>	<b>42</b>



Slika 23. Grafički prikaz solarnog zračenja po mjesecima u godini za grad Miami.

Tablica 7. Vrijednosti solarnog zračenja po mjesecima u godini za grad Vis (Split) [29].

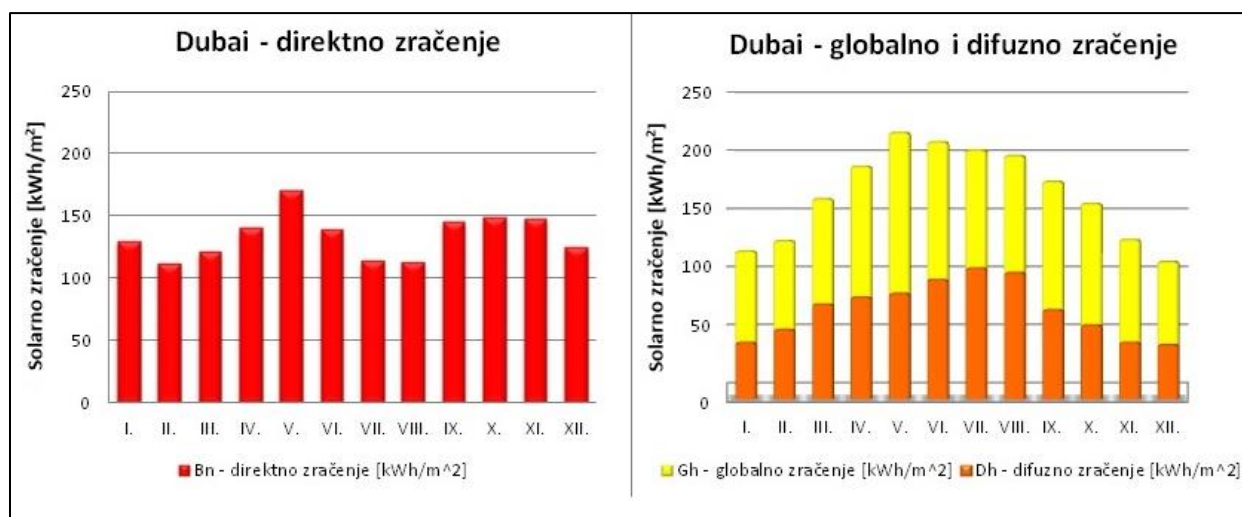
Mjeseci	Globalno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Difuzno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Direktno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Učešće difuznog zračenja (%)
Siječanj	54	25	87	41
Veljača	77	31	78	46
Ožujak	125	50	117	50
Travanj	158	71	136	46
Svibanj	203	77	171	41
Lipanj	222	73	167	48
Srpanj	224	74	222	55
Kolovoz	198	64	168	54
Rujan	150	46	167	43
Listopad	111	34	111	40
Studeni	65	24	74	38
Prosinac	50	22	80	42
<b>Ukupno</b>	<b>1632</b>	<b>590</b>	<b>1578</b>	<b>46</b>



Slika 24. Grafički prikaz solarnog zračenja po mjesecima u godini za grad Vis.

Tablica 8. Vrijednosti solarnog zračenja po mjesecima u godini za grad Dubai [29].

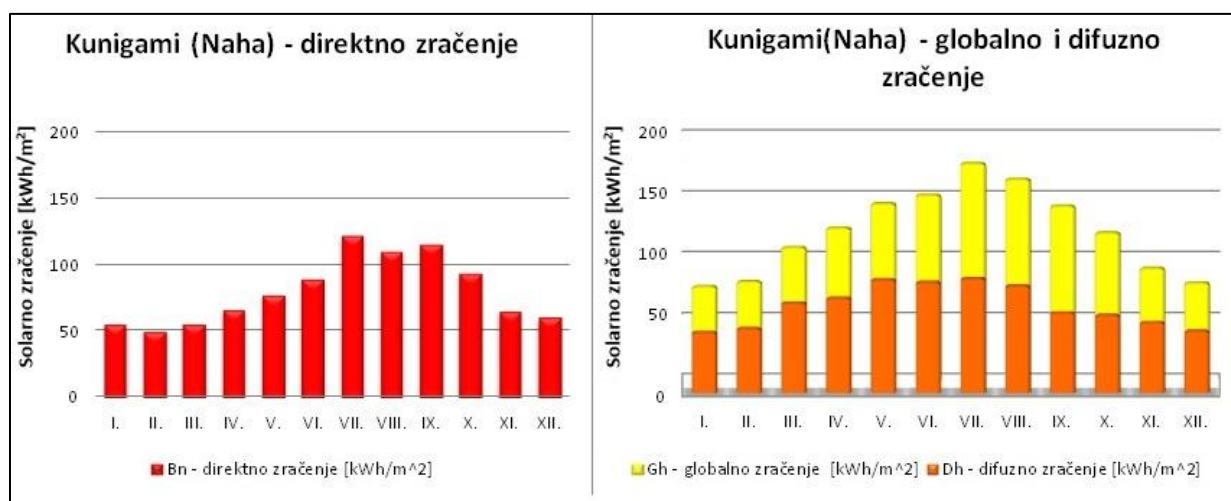
Mjeseci	Globalno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Difuzno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Direktno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Učešće difuznog zračenja (%)
Siječanj	118	48	130	41
Veljača	127	59	112	46
Ožujak	163	81	121	50
Travanj	191	87	140	46
Svibanj	220	90	170	41
Lipanj	212	102	139	48
Srpanj	205	112	114	55
Kolovoz	200	108	113	54
Rujan	178	76	145	43
Listopad	159	63	149	40
Studeni	128	48	148	38
Prosinac	109	46	125	42
<b>Ukupno</b>	<b>2009</b>	<b>920</b>	<b>1605</b>	<b>46</b>



Slika 25. Grafički prikaz solarnog zračenja po mjesecima u godini za grad Dubai.

Tablica 9. Vrijednosti solarnog zračenja po mjesecima u godini za grad Kunigami (Naha)[29].

Mjeseci	Globalno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Difuzno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Direktno zračenje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Učešće difuznog zračenja (%)
Siječanj	77	49	55	64
Veljača	81	52	50	64
Ožujak	109	73	55	67
Travanj	125	77	66	62
Svibanj	145	92	77	63
Lipanj	152	90	89	59
Srpanj	178	93	122	52
Kolovoz	165	87	110	53
Rujan	143	65	115	45
Listopad	121	63	93	52
Studeni	92	57	65	62
Prosinac	80	50	60	63
<b>Ukupno</b>	<b>1465</b>	<b>849</b>	<b>957</b>	<b>58</b>



Slika 26. Grafički prikaz solarnog zračenja po mjesecima u godini za grad Kunigami.



Lokacija na otoku Okinawa (Kunigami, Japan) uzeta je i iz tog razloga jer se tamo nalazi prva reverzibilna hidroelektrana na svijetu s morskom vodom [30], (Slika 27.), tako unatoč njenom stavljanju izvan pogona, ona ipak predstavlja potencijal za korištenje zajedno s Seawater Steam Engine tehnologijom.



*Slika 27. Prva reverzibilna hidroelektrana s morskom vodom na svijetu [30].*



## 4. REZULTATI

Tablica 10. Korelacijska tablica karakterističnih parametara za četiri lokacije.

	Karakteristični parametri	Lokacije			
		MIAMI	VIS	DUBAI	KUNIGAMI
1	$B_n$ [kWh/m <sup>2</sup> /a]	1491	1578	1605	957
2	Broj stanovnika	453579	3.637	3103000	4908
3	$E_{el}$ (potrošnja) [GWh]	2374	20	43093	25
4	$W$ (potrošnja) [hm <sup>3</sup> ]	25	0.45	533	0.3
5	$P_{el}$ (SSE) [MW]	6863	52	43354	116
6	$E_{el}$ (SSE) (proizvodnja) [GWh]	6707	55	49091	47
7	$W$ (SSE) (proizvodnja) [hm <sup>3</sup> ]	60	0.48	408	0.65
8	$A_{coll}$ [km <sup>2</sup> ]	49	0.37	310	0.83
9	$Q_{coll(i)}$ [kWh/m <sup>2</sup> a]	434	459	467	278
10	$Q_{coll}$ [kWh]	20120	165	147272	140
11	$P_{el}$ (SSE)/(broj stanovnika) [kW/stanovniku]	15	14	14	24
12	$W$ (SSE) (proizvodnja)/ $A_{coll}$ [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> a]	1.22	1.29	1.32	0.78
13	$W$ (SSE)(proizvodnja) [hm <sup>3</sup> ]	60	0	408	1

Potreba za električnom energijom prikazanih gradova je različita s obzirom na broj stanovnika koji u njemu obitavaju. Vis i Kunigami su gradovi sličnog broja stanovnika te je prema tome i slična potrošnja električne energije. Miami i Dubai broje mnogo više stanovnika pa tako Miami broji 125 puta veći, dok Dubai čak 853 puta veći broj stanovnika u odnosu na stanovništvo Visa. Prema tome, u jednoj gruboj aproksimaciji, potrošnja električne energije za svaki grad izračunata je umnoškom potrošnje električne energije po osobi za svaki grad i brojem stanovnika.

Preciznije vrijednosti potrošnje električne energije za gradove Vis i Dubai iznose  $E_{el} = 20$  GWh, odnosno  $E_{el} = 43093$  GWh, preuzete su iz rada „*Seawater Steam Engine - The most powerful technology for building sustainable communities and stopping the climate change*“ [31]. Potrošnje električne energije za gradove Miami i Kunigami izračunate su umnoškom potrošnje električne energije po osobi i brojem stanovnika. Potrošnja električne energije po osobi za grad Miami iznosi  $E_{el} = 5233$  kWh [32], a za grad Kunigami  $E_{el} = 5165$  kWh. Prema tome, ukupna godišnja potrošnja električne energije za gradove Miami i Kunigami iznose  $E_{el} = 2374$  GWh/a i  $E_{el} = 25$  GWh/a respektivno. Ukupna godišnja potrošnja električne energije za Vis (koja je dobivena mjerenjem i iznosi  $E_{el} = 20$  GWh) i za Kunigami ( $E_{el} = 25$  GWh) su

približno iste, dok Miami i Dubai (koji troši 43093 GWh) zahtijevaju značajno veću opskrbu električnom energijom jer je njihova potrošnja mnogo veća (pogotovo za Dubai).

Dnevna potreba pitke vode po osobi iznosi 150 L/dan. Uzimajući to u obzir te broj stanovnika svakog grada, unutar jedne godine dobiva se godišnja potrošnja vode svakog grada. Vis i Kunigami imaju također i potrošnju vode na godišnjoj razini sličnu zbog sličnog broja stanovnika, dok Dubai opet značajno odskače.

Ovisno o potrebama za električnom energijom i pitkom vodom svakog grada, bitna je veličina SSE sustava koja se očituje u nominalnoj snazi solarnih kolektora koja onda determinira i snagu cijelog sustava. Snaga SSE sustava, dobivena prema modelu iz rada [26] za grad Vis iznosi  $P_{el(SSE)} = 52$  MW. Linearnom korelacijom dobiveni su podaci i za preostala tri grada.

Na taj način, dobivena snaga za grad Miami iznosi  $P_{el(SSE)} = 6863$  MW, za Dubai  $P_{el(SSE)} = 43354$  MW te za Kunigami  $P_{el(SSE)} = 116$  MW.

Ukupna proizvedena količina električne energije  $E_{el(SSE)}$  prema izrazu (3) izračunata je za otok Vis te iznosi  $E_{el(SSE)} = 55$  GWh. Linearnom korelacijom dobivene su vrijednosti proizvedene električne energije za gradove Miami ( $E_{el(SSE)} = 6707$  GWh), Dubai ( $E_{el(SSE)} = 49091$  GWh) i Kunigami ( $E_{el(SSE)} = 47$  GWh). Uzimajući u obzir dobivene podatke za potrošnju električne energije svakog grada, vidi se da je proizvedena električna energija SSE sustavima veća od one koje su potrebne da svakom promatranom gradu, ali ta rezerva je važna kako bi se ti gradovi mogli dalje razvijati.

Površina cjelokupnog kolektorskog sustava  $A_{coll}$  ( $m^2$ ) dana je izrazom [27]:

$$A_{coll} = \frac{P_{el(ST)}}{\eta_{0,el}} \cdot G_0 \quad (16)$$

gdje je:  $\eta_{0,el} = 14\%$  [34] te predstavlja efikasnost pretvorbe solarne u električnu energiju, dok nominalna vrijednost intenziteta solarnog zračenja iznosi  $G_0 = 1000$  W/m<sup>2</sup>.

Prema tome, površina kolektorskog sustava  $A_{coll}$  za grad Vis izračunata je prema izrazu (16):

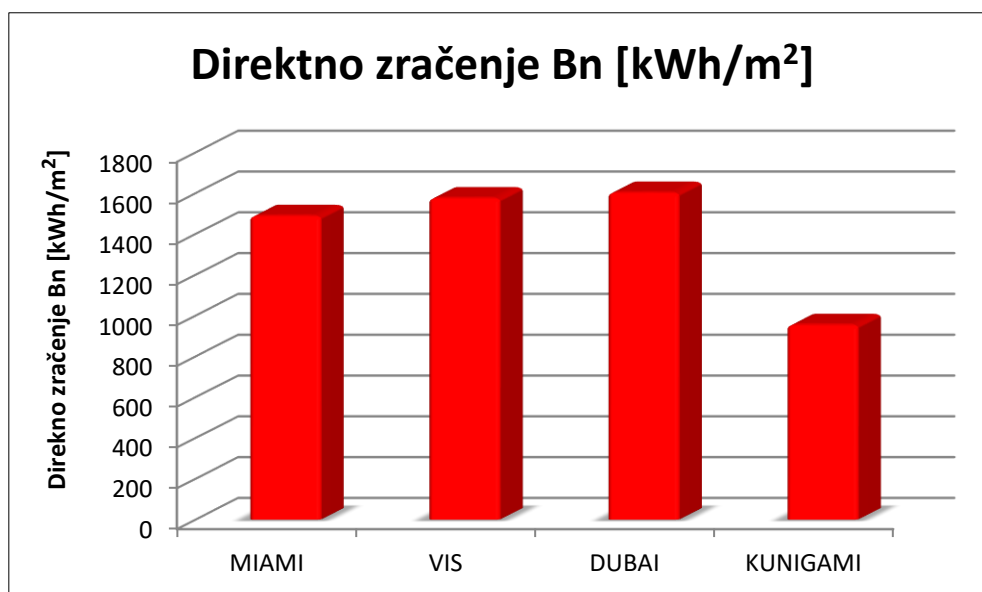
$$A_{coll} = \frac{P_{el(ST)}}{\eta_{0,el}} \cdot 1000 = \frac{52}{0,14} * 1000 = 371428 \text{ m}^2 \quad (17)$$

Na taj način dobivene su vrijednosti za preostala tri grada. Prema tome, površina kolektorskog sustava  $A_{\text{coll}}$  za grad Miami iznosi  $A_{\text{coll}} = 49 \text{ km}^2$ , za Dubai  $A_{\text{coll}} = 310 \text{ km}^2$  i za Kunigami  $A_{\text{coll}} = 0.83 \text{ km}^2$ . Površina kolektorskog sustava proporcionalna je potrebi potrošača za električnom energijom i pitkom vodom, a što je proporcionalno broju stanovnika. Što je više stanovnika, veća je potreba za proizvodnjom električne energije i pitke vode, a samim time i za većom površinom kolektorskog sustava kako bi se mogla proizvesti što veća količina energije i pitke vode.

Ukupna godišnja jedinična proizvodnja toplinske energije kolektorskog polja izvedena je i izračunata iz jednadžbi (4) i (5) te za otok Vis iznosi  $Q_{\text{coll}(j)} = 459 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Vrijednosti za Miami, Dubai i Kunigami dobivene su linearnom korelacijom uzimajući u obzir omjer solarnog zračenja za određeni grad u odnosu na solarno zračenje za otok Vis. Dobivene su vrijednosti  $Q_{\text{coll}(j)(\text{Miami})} = 434 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ,  $Q_{\text{coll}(j)(\text{Dubai})} = 467 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  i  $Q_{\text{coll}(j)(\text{Kunigami})} = 278 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ .

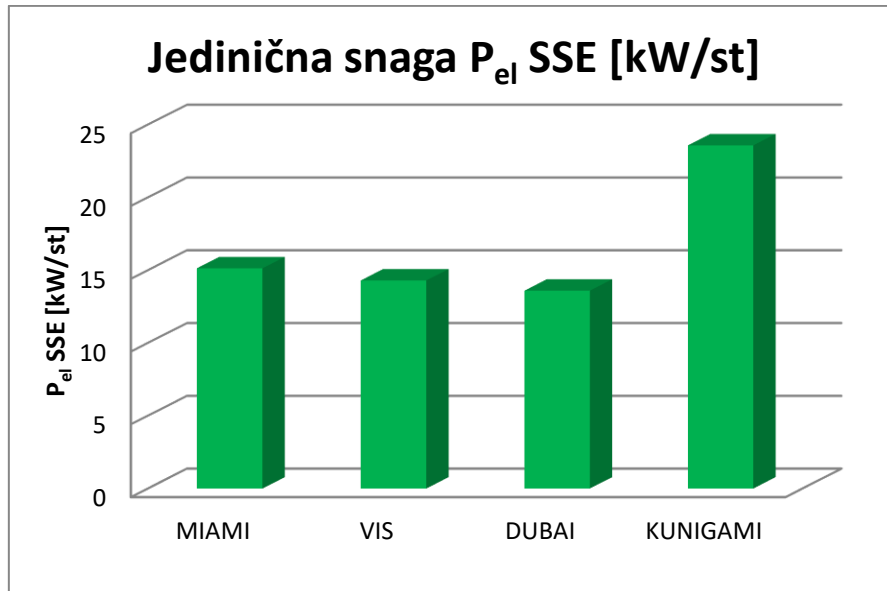
Ukupna toplinska energija koju SSE sustav od 52 MW otoka Visa godišnje može proizvesti, uzimajući u obzir površinu kolektorskog sustava, iznosi  $Q_{\text{coll}} = 165 \text{ kWh/a}$ . Za SSE sustav grada Miami-a ukupna toplinska energija iznosi  $Q_{\text{coll}} = 20120 \text{ kWh/a}$ , za Dubai je dobivena vrijednost  $Q_{\text{coll}} = 147272 \text{ GWh/a}$  te za Kunigami  $Q_{\text{coll}} = 140 \text{ GWh/a}$ .

Na Slici 28. prikazana je usporedba direktnog solarnog zračenja za gradove Miami, Vis, Dubai i Kunigami. Podaci pokazuju da najviše direktnog zračenja u godini ima grad Dubai  $B_n = 1605 \text{ kWh/m}^2$ , a najmanje grad Kunigami  $B_n = 957 \text{ kWh/m}^2$ . Miami ( $B_n = 1491 \text{ kWh/m}^2$ ) i Vis ( $B_n = 1578 \text{ kWh/m}^2$ ) imaju približno sličnu količinu solarnog zračenja.



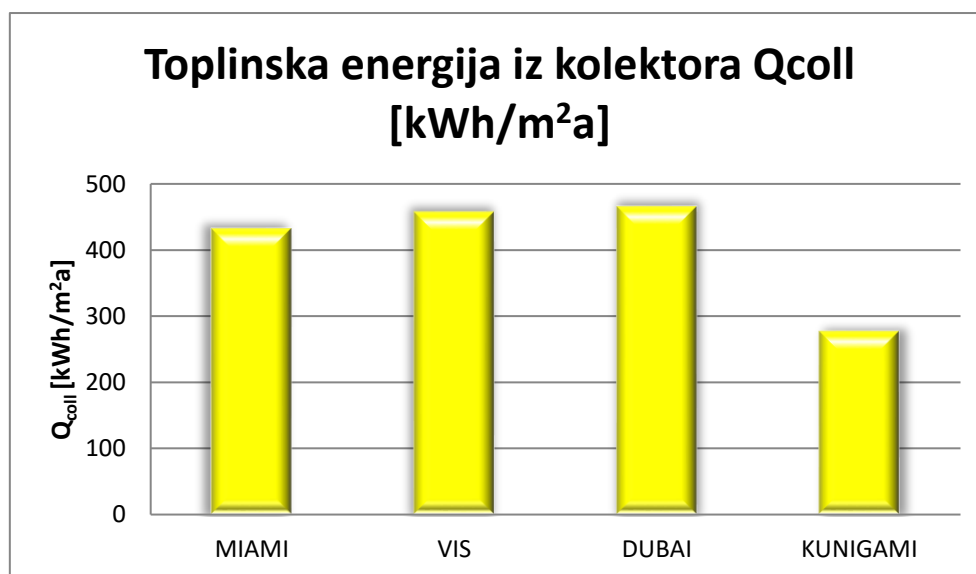
Slika 28. Usporedba direktnog solarnog zračenja za sve četiri lokacije.

Na Slici 29. dan je grafički prikaz snage sustava po stanovniku za: Miami, Vis, Dubai i Kunigami. Iz priloženog grafičkog prikaza vidljivo je kako je daleko najmanji omjer snage SSE sustava o broju stanovnika za grad Dubai, dok je najveći omjer za grad Kunigami.

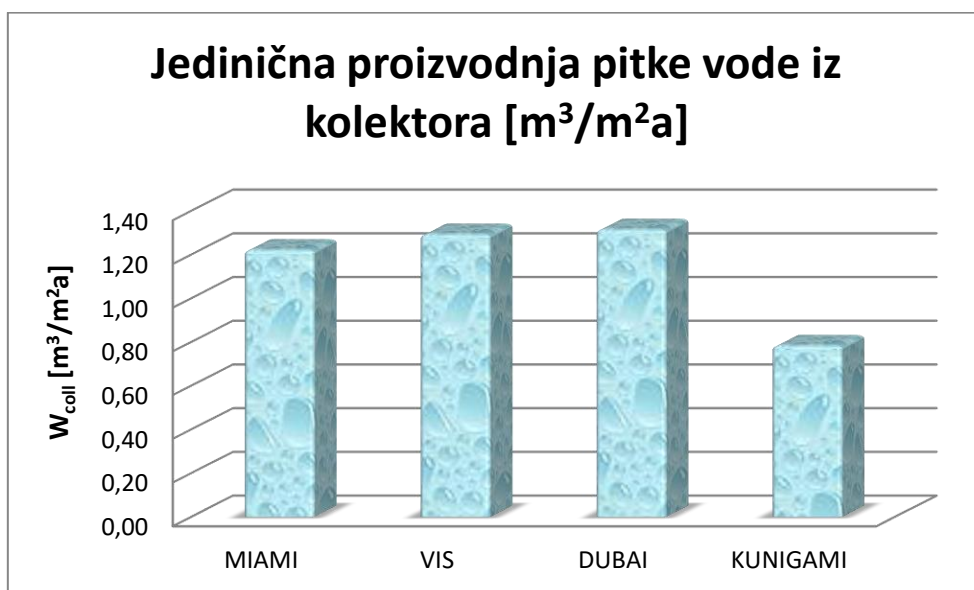


Slika 29. Grafički prikaz snage sustava po stanovniku za svaki grad.

Na Slici 30. dan je grafički prikaz jedinične toplinske energije (dakle, po  $m^2$  kolektora) koja se može proizvesti na promatranim lokacijama u toku godine, dok je na Slici 31. dana jedinična proizvodnja pitke vode koja se može proizvesti na promatranim lokacijama u toku godine.

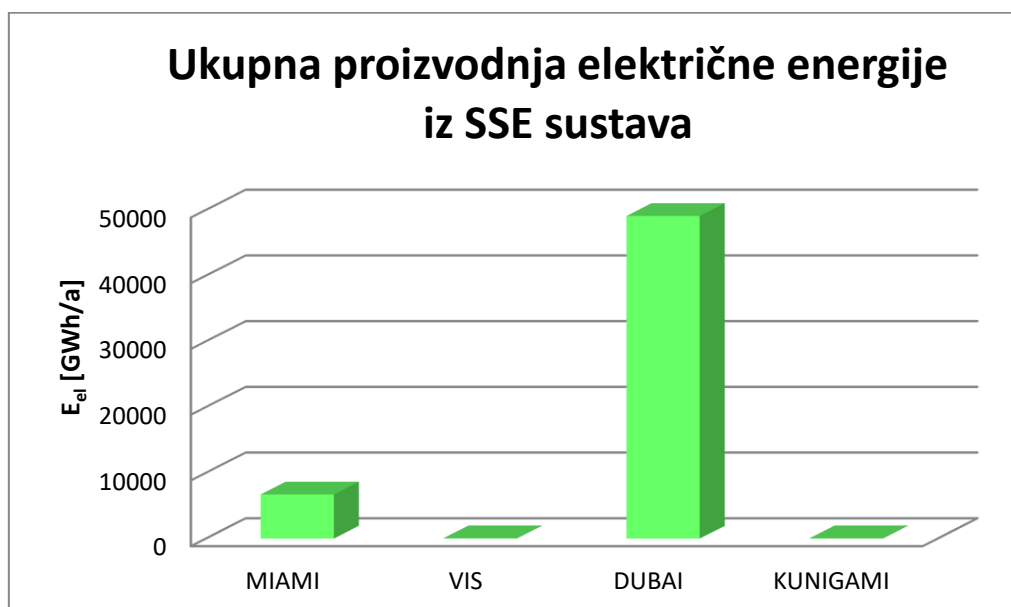


Slika 30. Grafički prikaz jedinične proizvodnje toplinske energije iz kolektora.

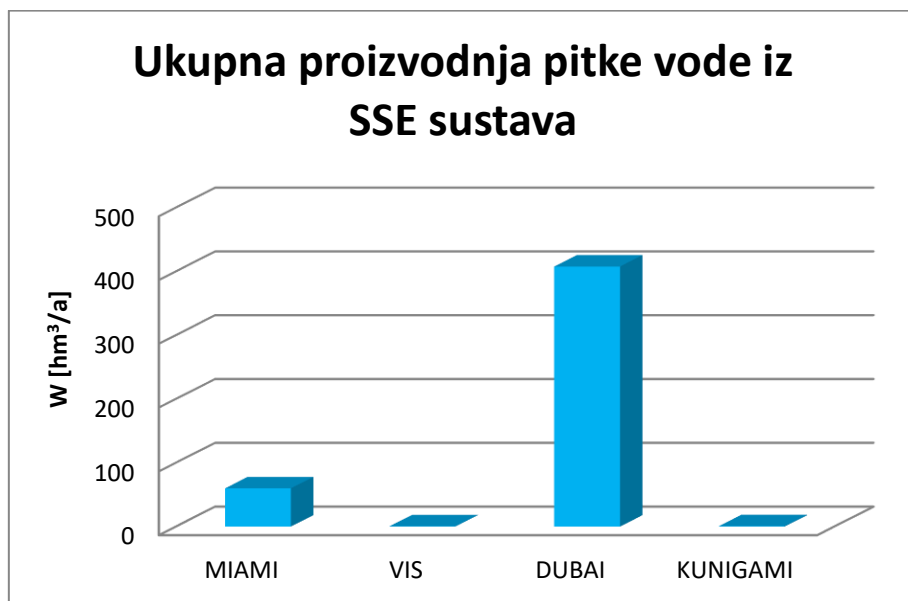


Slika 31. Grafički prikaz jedinične proizvodnje pitke vode iz kolektora.

Na Slici 32. su prikazane ukupne godišnje proizvodnje električne energije iz SSE sustava za sve promatrane lokacije (gradove), dok su na Slici 33. prikazane ukupne godišnje proizvodnje pitke vode iz SSE sustava.



Slika 32. Grafički prikaz ukupne proizvodnje električne energije SSE sustavom.



*Slika 33. Grafički prikaz ukupne proizvodnje pitke vode SSE sustavom.*

## 5. RASPRAVA I ZAKLJUČCI

Radom je prikazana radikalno nova tehnologija *Seawater Steam Engine* koja može istovremeno proizvoditi i energiju i pitku vodu, a što omogućava neovisnost naselja i gradova od vanjskih izvora energije i pitke vode i u tom smislu izgradnju održivih zajednica.

U radu je objašnjeno i u čemu se sastoji radikalnost nove tehnologije te je u tom smislu navedeno da se SSE tehnologija temelji na različitim znanstvenim i inženjerskim principima, u odnosu na postojeće tehnologije. Slijedom toga, SSE tehnologija je i uspoređena s parnim strojem, a sve kako bi se pokazalo u čemu se sastoji taj iskorak/proboj (breakthrough).

Ukratko, umjesto strujanja demineralizirane vode kroz apsorpcijske cijevi solarnih paraboličnih kolektora DSG tehnologije, u SSE tehnologiji kroz kolektore struji morska voda i na taj se način za jedan ulaz (solarna energija), dobivaju dva izlaza (električna energija i pitka voda), a što daje jednu sasvim novu kvalitetu koja postaje posebno važna u vrijeme sve većih problema koje klimatske promjene izazivaju.

Na osnovi matematičkog modela koji je razvijen u radu [26], u ovom je radu istražena mogućnost primjene SSE tehnologije na 4 lokacije u svijetu: Miami (SAD), Vis (Hrvatska), Dubai (UAE) i Kunigami (Japan), pri čemu dobiveni rezultati pokazuju da su na lokacijama s većim učešćem direktnog solarnog zračenja veće i vrijednosti proizvedene energije i pitke vode. Konkretno, Vis se nalazi na  $43^\circ$  sjeverne geografske širine, njegova vrijednosti direktnog solarnog zračenja su  $1578 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (dakle, veće od Miamia i Kunigamia, ali ipak manje od Dubaia), a što onda rezultira i potrebnom manjom jediničnom snagom SSE sustava.

S druge strane, grad Kunigami, koji je praktički na istoj geografskoj širini kao i Vis, zbog manjeg učešća direktnog solarnog zračenja (odnosno većeg difuznog zračenja, a što upućuje na zamućenu ili onečišćenu atmosferu) trebao bi imati i najveću jediničnu snagu SSE sustava.

Jedinična toplinska energija koju kolektorski sustavi mogu proizvesti (računata na  $\text{m}^2$  aperture kolektorske površine) također je relativno velika za lokacije s relativno velikim učešćem direktnog solarnog zračenja, a što je slučaj i s jediničnom proizvodnjom pitke vode.

Naravno, veličina SSE sustava je određena i veličinom konzuma, odnosno potrošnjom električne energije i pitke vode te je tako za Dubai ona i znatno veća od ostalih gradova, dok je potrošnja Miamia druga po veličini, a Vis i Kunigami su slične veličine pa je i njihova potrebna proizvodnja energije i pitke vode slična.

Obzirom da se umjesto solarnih paraboličnih kolektora mogu koristiti i drugi obnovljivi izvori energije (kao npr. vjetar), to znatno proširuje područje primjene SSE tehnologije. S druge strane, kako se umjesto skladištenja energije reverzibilnom hidroelektranom mogu koristiti i druge tehnologije skladištenja, to također pruža mogućnost veće primjene SSE tehnologije.

Zbog navedenih razloga, SSE tehnologija u osnovi predstavlja *'core technology'* koja se može nadograđivati, što joj znatno povećava područje te kako je to pokazano u knjizi *„Seawater Steam Engine as a prime mover for third industrial revolution“* [3], SSE tehnologija ima potencijal i zadovoljavanja ukupne svjetske potrošnje energije i pitke vode te na taj način predstavlja trenutno i najsnažniju tehnologiju za zaustavljanje klimatskih promjena.



## POPIS SIMBOLA:

OZNAKA	JEDINICA	ZNAČENJE
$A_{coll}$	$m^2$	Površina kolektorskog sustava
$C$		Geometrijski omjer koncentracije
$A_1$	$m$	Površina aperture (otvora) kolektora
$A_2$	$m$	Površina apsorpcijske cijevi na koji se reflektira solarno zračenje
$Re$		Reynolds-ov broj
$\rho$	$kg/m^3$	Gustoća fluida
$v$	$m/s$	Brzina strujanja fluida
$\mu$	$kg/(m\ s)$	Dinamička viskoznost
$\bar{Q}$	$J/m^2$	Toplinska energija
$E_{el}$	GWh	Električna energija
$\bar{\eta}_{Q-EL}$		Učinkovitost pretvorbe toplinske u električnu energiju
$f_m$		Faktor prilagođenja tereta karakteristikama generatora
$F$		Faktor učinkovitosti odvođenja topline
$E_{S(coll)}$	$J/m^2 dan$	prosječno prikupljena Sunčeva energija
$R_h$		Vremenski integral globalnog zračenja
$E_{S(h)}$	$Jm^{-2}$	Prosječna dnevna radijacija globalnog zračenja na horizontalnoj površini
$R_d$		Vremenski integral difuznog zračenja
$E_{S(d)}$	$Jm^{-2}$	Prosječna dnevna radijacija difuznog zračenja na horizontalnoj površini
$R_{coll}$		Omjer prosječnog dnevnog prikupljenog zračenja nagnute ravnine solarnih paraboličnih kolektora i horizontalne ravnine.
$K_h$		Indeks jasnoće
$X$		Kritični omjer
$\bar{\Phi}$		Faktor iskorištenja solarne energije
$\bar{q}_u$	$J/m^2 / dan$	Gubitak topline s površine kolektorske cijevi
$\bar{\eta}_{opt}$		Prosječna optička učinkovitosti kolektora

$t_c$	h	Vrijeme kada kolektori ne rade
$U$	$W/m^2K$	Koeficijent prijenosa topline
$T_{coll}$	K	Temperatura površine cijevi kolektora
$T_a$	K	Temperatura okoline
$a, b$		koeficijenti tipični za određenu vrstu kolektora
$\rho_{H_2O}$	$kg/m^3$	Gustoća vode
$P_{el(NOM)}$	W	Nominalna snaga solarnog generatora
$\eta_{ME}$		Učinkovitost pretvorbe mehaničke energije u električnu energiju
$\eta_{TUR}$		Učinkovitost turbine
$\Delta h$	J/mol	Razlika entalpije pare na ulazu i izlazu turbine
$f_{t-DIR(i)}$		Faktor udjela sati direktnog Sučevog zračenja u odnosu na trajanje ukupnog izlaganja Suncu
$N$		Broj vremenskih koraka
$G_h$	$kWh/m^2$	Globalno Sunčevo zračenje
$D_h$	$kWh/m^2$	Difuzno horizontalno zračenje
$B_n$	$kWh/m^2$	Direktno solarno zračenje
$E_{el(potrošnja)}$	GWh	Ukupna potrošnja električne energije
$W_{(potrošnja)}$	$hm^3$	Ukupna potrošnja pitke vode
$P_{el(SSE)}$	MW	Snaga SSE sustava
$E_{el(SSE)} (proizvodnja)$	GWh	Ukupna količina proizvedene električne energije
$W_{(SSE)(proizvodnja)}$	$hm^3$	Ukupna količina proizvedene pitke vode
$Q_{coll(j)}$	$kWh/m^2$	Jedinična toplinska energija kolektora
$Q_{coll}$	kWh	Ukupna toplinska energija kolektora

## LITERATURA:

- [1] Europsko vijeće, Vijeće Europske unije, Pariški sporazum o klimatskim promjenama, <http://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/timeline/>, (pristup 20. kolovoza 2018.godine)
- [2] SolarPACES, Potential for Solar Thermal Energy By Country, <http://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-potential-solar-thermal-energy-by-member-nation/>, (pristup 21. kolovoza 2018.godine)
- [3] Glasnović, Z., Margeta, K., *Seawater Steam Engine as a 'prime mover' for the third industrial revolution*, LAP Lambert, Academic Publishing, Saarbuecken, Germany, 2017.
- [4] Sharqawy, M.H., Lienhard, V.J.H., Zubair, S.M., Thermophysical Properties of Seawater: A Review of Existing Correlations and Data, *Desalination and Water Treatment*, 16 (2010), 354-380.
- [5] United States Secretary of Energy, U.S. Department of Energy (DOE), Solar Desalination <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-desalination>, (pristup 05.rujna 2018.godine)
- [6] Fernandez-Garcia, A., Zarza, E., Valenzuela, L., Perez, M., Parabolic-trough solar collectors and their applications, (2010) 1695-1721.
- [7] University of Houston, Solar Power in 1884, <https://www.uh.edu/engines/ericssonsolarengine.jpg>, (pristup 20. kolovoza 2018.godine)
- [8] Feldhoff, F., Direct Steam Generation (DSG), Technology Overview, SFERA Summer School 2012, June 28, 2012, Almería, Spain, 2012.
- [9] Günther, M., Joemann, M., Csambor S., Enermena, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Chapter 5, Parabolic Trough Technology, 2014.
- [10] Fraidenraich, N., Oliveira, C., Vieira da Cunha, A., Gordon, J.M., Vilela, O., Analytical modeling of DSG solar power plants, *Solar Energy* 98 (2013) 511-522.
- [11] Solar Concentration efficiency.png, Chambon, M., Maximum solar-to-work efficiency for a simplified solar receiver relative to the temperature for various concentrations, 2010, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_concentration\\_efficiency.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_concentration_efficiency.png) (pristup 29. kolovoza 2018.godine)
- [12] Šömen, M., Analiza delovanja eksperimentalnega sistema za določevanje karakteristik uparjanja, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2016.

- [13] Zarza, E., Solar energy conversion and photoenergy systems – Vol. I - Medium Temperature Solar Concentrators (Parabolic-Troughs Collectors), Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)
- [14] Odeh, S.D., Morrison, G. L. , Behnia, M., Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors, Solar Energy 62(6), (1998) 395-406.
- [15] Yadav S., History of Reynolds, 2015,  
[http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/44264/1/chapter-1\(introduction-under%20preparation\).pdf](http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/44264/1/chapter-1(introduction-under%20preparation).pdf), (pristup 22. kolovoza 2018.godine)
- [16] CFD support, <https://www.cfdsupport.com/openfoam-training.html>, (pristup 23. kolovoza 2018.godine)
- [17] Wilcox, D. C. et al., Turbulence modeling for CFD, Vol. 2, DCW industries La Canada, CA, (1998.) 11-17.
- [18] Ž. Olujić, Predviđanje pojavnih oblika pri horizontalnom dvofaznom strujanju plinsko - kapljevinskih smjesa u cijevima, Kem. Ind., 29 (1980) 543-549.
- [19] Pavković, B. Tehnika hlađenja, Izmjenjivači topline, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2007.
- [20] Sander, A., Odabrani toplinski separacijski procesi za procese prijenosa tvari i separacija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Interna skripta, 2014/2015.
- [21] Zarza, E., Rojas, M.E., Gonzalez, L., Caballero, J.M., Rueda, F., The first pre-commercial DSG solar power plant, (2006) 1270-1276.
- [22] Zarza, E., Valenzuela, L., León, J., The DISS Project: Direct Steam Generation in Parabolic Trough Systems. Operation and Maintenance Experience and Update on Project Status, (2002) 12-133.
- [23] Glasnović, Z., Margeta, K., Rogosic, M., „Solar thermal hydro electric power plant for simultaneously energy and drinking water production“, WIPO, WO/2013/072709.
- [24] Glasnović, Z., Margeta, J. „Solar thermal hydro electric power plant with direct pumping system“ WIPO, WO/2013/011333.
- [25] Glasnović, Z., Margeta, J. „Solar Hydro Electric Power Plant“. WIPO, WO/2009/118572.
- [26] Glasnović, Z., Margeta, K., Premec, K. Could Key Engine, as a new open-source for RES technology development, start the third industrial revolution?. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57 (2015), 1194-1209.
- [27] Glasnović, Z., Rogošić, M., Margeta, J., A Model for Optimal Sizing of Solar Thermal Hydroelectric Power Plant, Solar energy. 85 (5) (2011), 794-807.

- [28] ISOBudgets, How to Calculate Local Gravity, 2014, <http://www.isobudgets.com/how-to-calculate-local-gravity/>, (pristup 26. kolovoza 2018.godine)
- [29] Meteonorm 7.2.4 (04/05/2018), Irradiation data for every place on Earth, <https://www.meteonorm.com/>
- [30] Fujihara, T., Imano, H., Oshima, K.. Development of Pump Turbine for Seawater Pumped-Storage Power Plant, Hitachi Review, 47, (1998), 199-202.
- [31] Margeta, K. Glasnović, Z. „Seawater Steam Engine-The most powerful technology for building sustainable communities and stopping the climate change“, II International Energy & Environmental Summit – 2017, Dubai, UAE, 18-20.11. 2017.
- [32] Miami-Dade County, Energy - Electricity & Fuel, [https://www.miamidade.gov/greenprint/planning/library/milestone\\_one/energy.pdf](https://www.miamidade.gov/greenprint/planning/library/milestone_one/energy.pdf) (pristup 25. kolovoza 2018.godine)
- [33] The Okinawa Electric Power Company, Management Reference Materials, May 2016, [https://www.okiden.co.jp/shared/pdf/ir/ar/ar2016/160518\\_02.pdf](https://www.okiden.co.jp/shared/pdf/ir/ar/ar2016/160518_02.pdf) (pristup 25.kolovaza 2018.godine)
- [34] Mehos, M.S., 2009. Part 3: Task I: Solar Thermal Electric Systems, SolarPaces, Annual Report 2008. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.361.988&rep=rep1&type=pdf> (pristup 26. kolovoza 2018. godine)

