

Primjena solarnog dimnjaka za proizvodnju električne energije

Šplajt, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:564410>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**PRIMJENA SOLARNOG DIMNJAKA ZA
PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Diplomski rad

Luka Šplajt

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Luka Šplajt
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1476, 07.10.2022.
JMBAG:	0165083565
Mentor:	prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Sumentor:	dr. sc. Dina Jukić
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Primjena solarnog dimnjaka za proizvodnju električne energije
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Zadatak diplomskog rada je uvidom u znanstvene baze provesti analizu potencijala primjene solarnog dimnjaka za proizvodnju električne energije. Na osnovu realnih podataka skalirati dosadašnja tehnička rješenja i izraditi funkcionalni model. Pomoću modela provesti analizu ulaznih i izlaznih veličina i donijeti zaključke s posebnim osvrtom na ograničenja njegove primjene i očekivane podatke.
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	19.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	30.09.2024
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	30.09.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 30.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Luka Šplajt
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1476, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Primjena solarnog dimnjaka za proizvodnju električne energije**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš

i sumentora dr. sc. Dina Jukić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	2
1.2. Pregled postojećeg znanja iz područja solarnih dimnjaka	2
1.3. Metodologija istraživanja primjene solarnih dimnjaka u svrhu proizvodnje električne energije.....	3
2. Razvoj solarnih dimnjaka	5
2.1. Povijesni razvoj solarnih dimnjaka.....	5
2.2. Tehnička rješenja solarnih dimnjaka	5
2.3. Potencijal za tehničko unapređenje.....	8
3. Struktura i elementi solarnih dimnjaka	9
3.1. Kolektor	9
3.2. Toranj.....	12
3.3. Turbina	14
3.4. Tlo i pohrana energije.....	16
3.5. Namjena solarnih dimnjaka.....	18
3.6. Vrste tehničkih izvedbi	20
4. Modeliranje solarnog dimnjaka	28
4.1. Analiza inicijalnih parametara	28
4.2. Izrada matematičkog modela.....	29
5. Izrada makete solarnog dimnjaka	36
6. Simulacija termodinamičkog ponašanja matematičkog modela u ANSYS okruženju	42
7. Zaključak	61
LITERATURA	62
SAŽETAK	64
ABSTRACT	64
ŽIVOTOPIS	65

1. UVOD

Svjetska potrošnja, a time i potražnja električne energije postupno se povećava sa vremenom uslijed porasta populacije kao i razvoja tehnologija. Proizvodnja energije porasla je za 1,1 % između 2021. i 2022. godine, sa 177057 TWh na 178899 TWh. Većina proizvedene energije dolazi iz konvencionalnih, neobnovljivih izvora poput ugljena i nafte, te se javljaju problemi visoke cijene energenata, onečišćenja, stakleničkih plinova i sl. [1]

Kako bi se zadovoljila potražnja za električnom energijom, potrebno je okrenuti se alternativnim oblicima proizvodnje električne energije. Obnovljivi izvori energije pružaju rješenje ovome problemu tako što ne zahtijevaju konvencionalne energente, uz neznajno onečišćenje, bilo CO₂, zvučno ili svjetlosno.

Razvoj obnovljivih izvora je sve zastupljeniji u današnje doba, sa najvećim porastom instaliranog kapaciteta očitovanim u vjetroelektranama. U razdoblju od 2020. – 2022. godine proizvodnja iz vjetroelektrana se povećala sa 4186 TWh na 5488 TWh. [1]

Jedan od oblika elektrana na obnovljive izvore energije su solarni dimnjaci. Solarni dimnjaci koji služe kao elektrane (eng. *Solar Chimney Power Plant, SCPP*) koriste se sunčevom energijom te principom uzgona zraka a glavni dijelovi su kolektor, vjetroagregat i toranj. Zagrijavanjem zraka koji se nalazi između kolektora i podloge, gustoća mu se smanjuje te uslijed razlike tlakova na početku i kraju kolektora, on počne strujati prema tornju koji se nalazi u središtu kolektora, poznatom kao „dimnjak“. Prije prolaska kroz toranj zračna masa prolazi kroz vjetroturbinu te ju pokreće, a time se pokreće i generator koji je mehanički spojen sa turbinom te se proizvodi električna energija.

Solarni dimnjaci jedni su od rješenja svladavanja energetske krize zbog korištenja obnovljivog izvora energije, jeftine konstrukcije i mogućnosti postavljanja na obradive površine. Detaljnije će se proći kroz ovu temu u sljedećim poglavljima, kao i što je sve potrebno ostvariti da bi se izgradio solarni dimnjak.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak diplomskog rada je uvidom u znanstvene baze provesti analizu potencijala primjene solarnog dimnjaka za proizvodnju električne energije. Na osnovu realnih podataka skalirati dosadašnja tehnička rješenja i izraditi funkcionalni model. Pomoću modela provesti analizu ulaznih i izlaznih veličina i donijeti zaključke s posebnim osvrtom na ograničenja njegove primjene i očekivane podatke.

1.2. Pregled postojećeg znanja iz područja solarnih dimnjaka

Solarni dimnjaci relativno su novi pojam u elektrotehnici. Prvi koncept postoji od 1500. godine, dok se moderniji koncepti za svrhu proizvodnje električne energije kreću od 1900-ih [2], sa pilotnim postrojenjem izgrađenim 1982. [3]. Pomoću pilotnog postrojenja dobili su se rezultati koji su omogućili nastavak istraživanja koja su temeljena na stvarnim, izmjerenim vrijednostima u postrojenju. Prije korištenja u svrhu proizvodnje električne energije, solarni dimnjaci koristili su se u svrhu rashlađivanja i provjetravanja prostora. Hassan Abdallah et al. proveo je parametarsko istraživanje solarnih dimnjaka sa rashladnim tornjem za egipatsku klimu u [4], gdje je usporedio ovu izvedbu sa tradicionalnim klima uređajima. Daljnja istraživanja su provedena da bi se potvrdile simulacije vezane za rad solarnih dimnjaka, te kako bi se unaprijedila njihova učinkovitost. T.Ming u [5] je napravio potpunu analizu rada solarnih dimnjaka, uključujući numeričku simulaciju za dimnjak od 10 MW. Chiba et al. proveo je simulaciju u [6], gdje se analizirala povezanost između visine tornja i ostalih parametara, poput temperature i brzine strujanja. Sun et al. proveo je analizu povezanosti nagiba solarnog kolektora i izlaznih veličina [7]. Jawad et al. također je proveo analizu geometrije solarnog dimnjaka, ali za sve dijelove [8]. W.Haaf objavio je rezultate pilotnog postrojenja u [9], gdje je naglasio probleme postrojenja i lokacije na kojoj se nalazilo. Wang et al. napravio je simulaciju i eksperimentalno istraživanje postavljanja pregrada u kolektor solarnog dimnjaka [10]. C.D.Papageorgiou u [11] uspoređuje „plutajući“ solarni dimnjak sa betonskim, te komentira konstrukciju i moguća unaprijeđenja pojedinih dijelova dimnjaka. Singh et al. uvodi novu ideju postavljanja kolektorskog ulaza u obliku zvona [12]. Također analizira različite izvedbe tornjeva pomoću simulacije. Bernardes se bavi tehničkom, ekonomskom i ekološkom analizom solarnog dimnjaka u [13], gdje se također analiziraju različite mogućnosti izvedbi solarnih dimnjaka te optimalnog sastava tla. Nasraoui et al. bavi se numeričkim istraživanjem i eksperimentalnom validacijom tog istraživanja u [14]. Koristi se *CFD* simulacijama koje se potkrepljuju pomoću eksperimentalnog mjerenja na maketi solarnog dimnjaka. U [15] pomoću *CFD* simulacija utvrđuje optimalan oblik tornja solarnog

dimnjaka. Semai et al. u [16] analizira učinak gradnje tornja pod određenim kutevima te pohranu toplinske energije u kolektoru. Backstrom et al. je analizirao različite parametre za turbine solarnih dimnjaka kako bi se postigle optimalne performanse [17]. Nizetić et al. analizirao je parametre solarnih dimnjaka te mogućnost gradnje solarnog dimnjaka u mediteranskom području [18]. Analizirani su podaci za Split i Dubrovnik, kao i mjesečnu proizvodnju električne energije i broj pogonskih sati elektrane. Performanse solarnih dimnjaka na padini analizirao je Cao et al. za područja u Kini [19]. H. Tabor u [20] analizira različite vrste toplinske pohrane. Abdul Wahhab et al. analizirao je primjenu korištenja solarnih dimnjaka kao agrikulturnih staklenika [21]. Australški EnviroMission dizajnirao je vlastiti koncept solarnog dimnjaka koji se može koristiti za prikupljanje pitke vode [22]. Cao et al., osim općenite primjene solarnih dimnjaka na padini u Kini, je analizirao mogućnost njihove primjene za grad Lanzhou [23]. C. Papageorgiou također je analizirao primjenu solarnih dimnjaka u Kini, međutim za svoj koncept „plutajućih“ solarnih dimnjaka [24]. Zuo et al. analizirao je još jednu alternativnu izvedbu solarnih dimnjaka, a to je solarni dimnjak sa pomoćnim ventilatorom za stvaranje potlaka, u kombinaciji sa desalinizacijom vode [25]. Ming et al. napravio je numeričku analizu za solarni dimnjak sa blokadama vjetra na ulazu [26]. Cilj je bio uspostaviti učinkovitost postavljanja blokada kako bi se smanjio utjecaj vanjskog vjetra. Li et al. proveo je istraživanje koncepta integracije solarnog dimnjaka sa „tornado-tornjem“ u svrhu ekstrakcije energije vjetra na izlazu iz dimnjaka [27]. Zuo et al. osim solarni dimnjaka sa pomoćnim ventilatorom za stvaranje potlaka napravio i ekonomsku procjenu ovoga dimnjaka u kombinaciji sa otpadnom toplinom, nakon optimizacije parametara [28]. Pomoću *CFD* simulacija Torabi et al. analizirao je mogućnosti unaprijeđenja rada solarnog dimnjaka [29]. Negrou et al. u [30] koristi se inverznom metodom dizajniranja za dizajniranje vjetroturbine solarnog dimnjaka koji se koristi i geotermalnom energijom. Tu et al. u [31] detaljno prolazi kroz korištenje *CFD* programa, odnosno kako ih koristiti, te čime se koriste.

1.3. Metodologija istraživanja primjene solarnih dimnjaka u svrhu proizvodnje električne energije

Ovaj rad bavi se tematikom proizvodnje električne energije pomoću unikatnog rješenja korištenja solarne energije za pokretanje vjetroturbine objedinjenog u solarni dimnjak. Polazi se od povijesnog razvoja, gdje se prolazi kroz prve ideje i koncepte solarnih dimnjaka, sve do sadašnjih i potencijalnih izvedbi. Poglavlje 3 bavi se detaljnim analiziranjem konstrukcije solarnih dimnjaka, što čini solarni dimnjak, te koje sve namjene i tehničke izvedbe mogu imati. Nakon općenitog dijela o solarnim dimnjacima, u poglavlju 4 vrši se analiza potrebnih parametara za modeliranje solarnog dimnjaka. Ovdje se u obzir uzimaju omjeri pojedinih dijelova solarnog dimnjaka u

odnosu na ostale, dimenzije i pretpostavke potrebne za izradu matematičkog modela. Postavljaju se jednačbe koje opisuju procese koji se odvijaju u solarnom dimnjaku, a nužni su za njegov rad. Prema ovim spoznajama pravi se skalirana maketa solarnog dimnjaka sa postupkom objašnjenim u poglavlju 5. Svrha izrade makete je dokazivanje matematičkog modela pomoću mjerenja i usporedbe rezultata sa simulacijom koja se odvija u sljedećem poglavlju. Poglavlje 6 sadrži simulaciju termodinamičkog ponašanja modela solarnog dimnjaka koji je napravljen prema dimenzijama makete iz prethodnog poglavlja, a služi se matematičkim modelom iz poglavlja 4.

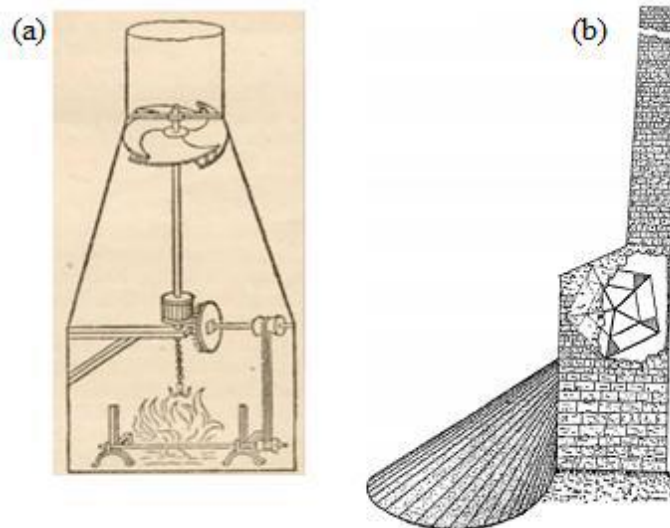
2. Razvoj solarnih dimnjaka

2.1. Povijesni razvoj solarnih dimnjaka

Prvi koncept solarnog tornja dolazi od Leonarda da Vinci-ja, prema njegovom nacrtu oko 1500. godine. Svrha ovoga koncepta je okretanje pečenke iznad vatre, a postiže se prolaskom dima kroz turbinu u dimnjaku. [2]

Prva ideja korištenja solarnog dimnjaka u svrhu proizvodnje električne energije potiče od Isodoro-a Cabanyesa 1903., u časopisu *La energia eléctrica*. [2]

Prvi izgrađeni solarni dimnjak-elektrana bio je pilotno postrojenje u Manzanaresu, Španjolskoj. Postrojenje je završeno 1982., a vođeno je Njemačkim inženjerom Jörg Schlaich-om. Sa kolektorom promjera 244 m i tornjem visokim 194,6 m, imalo je maksimalnu snagu od 50 kW. [3]

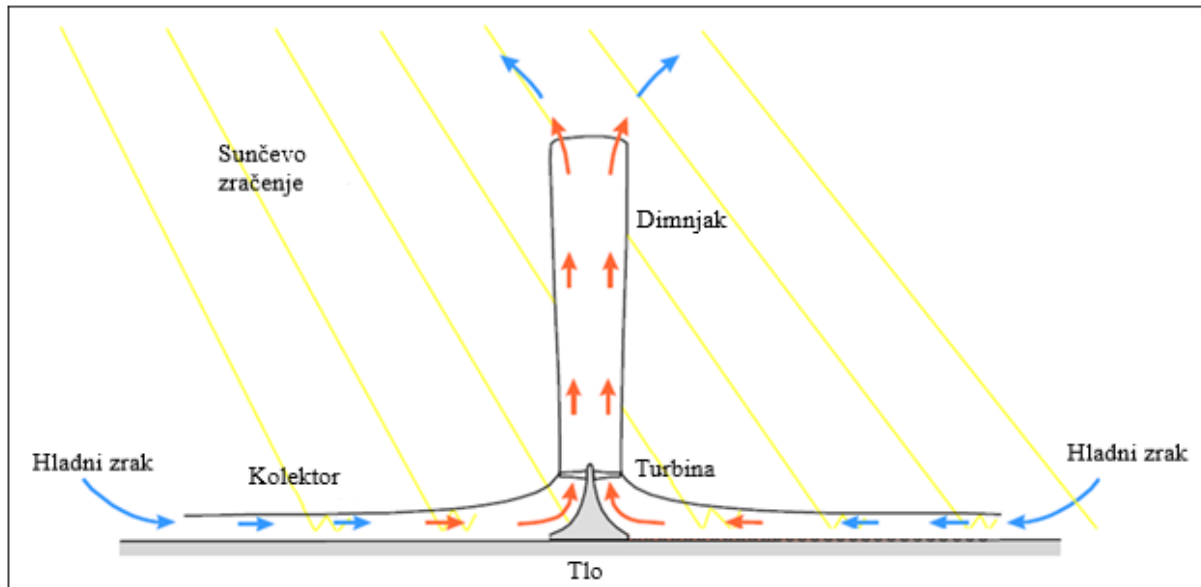


Sl. 2.1. Koncept Leonarda Davincia (a) i Isodora Cabanyesa (b) [2]

2.2. Tehnička rješenja solarnih dimnjaka

U sadašnjoj primjeni postoje dvije vrste solarnih dimnjaka, komercijalni solarni dimnjaci, koji služe za rashlađivanje, grijanje i/ili prozračivanje stambenih prostora te solarni dimnjaci koji služe kao elektrane. Razlike između ove dvije vrste su znatne, a u osnovi su povezane preko principa uzgona i korištenja sunčevom energijom kako bi se uzgon postigao. Komercijalni solarni dimnjaci koriste se arhitekturom stambenog objekta kako bi se postiglo neometano strujanje zraka iz okoline, kroz objekt i natrag u okolinu preko solarnog dimnjaka koji se nalazi na vanjskoj strani

objekta. [4] Kod solarnih dimnjaka kao elektrana (*SCPP*-ova), zračna masa se uslijed razlike tlaka na početku kolektora i izlazu tornja, kreće od kolektora prema središnjem tornju u kojem se nalazi vjetroagregat.



Sl. 2.2. Princip djelovanja solarnog dimnjaka [2]

Primjena *SCPP*-ova zavisi o lokaciji i investitorima. U hladnijim područjima izvedbe solarnih dimnjaka su znatno ograničene, te se mogu upotrijebiti samo za proizvodnju električne energije budući da je potrebno koristiti se reljefom područja odnosno uzvisinama. Kod toplijih podneblja, osim proizvodnje električne energije moguće je kolektor pretvoriti u staklenik sa svrhom proizvodnje hrane. Dodatne mogućnosti su desalinizacija ili prikupljanje vode iz vlage u zraku. U poglavlju 3 detaljnije će se proći kroz različite tipove *SCPP*-ova i svrhe.

Jedan od solarnih dimnjaka sa staklenikom bilo je pilotno postrojenje u Manzanaresu. Razvoj projekta je započeo 1979., a postrojenje je dovršeno 1982. sa ciljem određivanja izvedivosti i isplativosti, kao i dokazivanja izračuna mjerenjem stvarnih vrijednosti. Rezultati pogona postrojenja su dokazali da su prethodni izračuni točni. Ove rezultate objavio je Haaf et al. pod nazivom *Solar Chimneys Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares*. Autor je u zaključku naveo kako je solarne dimnjake najbolje koristiti u suhim predjelima, pogotovo između 30° geografske visine sjeverno i južno te da je potrebno koristiti zemljišta sa vrlo niskom cijenom otkupa. Pretpostavka Haaf-a je da solarni dimnjaci mogu služiti za postupak

elektrolize kako bi se dobio vodik koji se zatim može spremati i koristiti kao spremnik energije a time zamijeniti ulogu nafte. [3]

Osim pilotnog postrojenja, nema dostupnih informacija o daljnje izgrađenim postrojenjima, već samo o minijaturnim solarnim dimnjacima izgrađenim u svrhu istraživanja.

Na slici su prikazani neki od solarnih dimnjaka za istraživanje:

- a) Sherif et al., Florida, 1997.
- b) Zhou et al., Kina, 2002.
- c) Koyun et al., Botsvana, 2007.
- d) Ferreria et al., Brazil, 2008.



a)



b)



c)



d)

Sl. 2.3. Izgrađeni solarni dimnjaci za istraživanje [5]

2.3. Potencijal za tehničko unapređenje

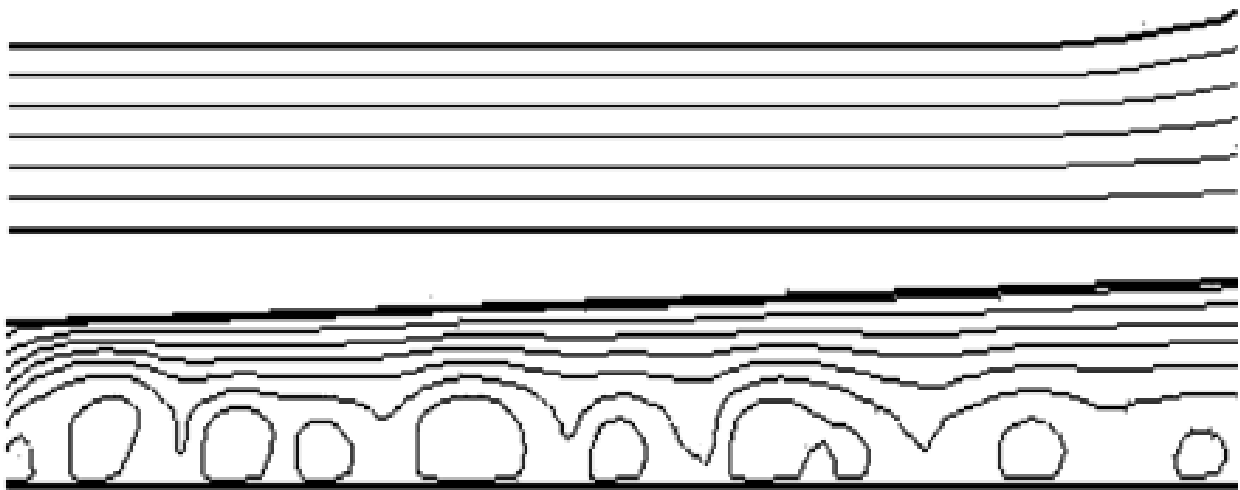
Koncept solarnog dimnjaka ima veliki potencijal, te su se vodila mnoga istraživanja u svrhu pronalaženja mogućnosti implementacije ove tehnologije. Uslijed znatnih problema koji sprječavaju izgradnju solarnih dimnjaka, poput visoke inicijalne cijene, iznimno niske učinkovitosti i tehničkih problema pri izgradnji velikih postrojenja, sva istraživanja vezana uz solarne dimnjake se skoro isključivo bave unapređenjem ove tehnologije kako bi izgradnja bila moguća i ekonomski opravdana. Potencijal za tehničko unapređenje leži u ispravljanju ovih problema, tako što se solarni dimnjaci kombiniraju sa drugim tehnologijama, poput toplinskih crpki, desalinizacije, prikupljanjem vode ili samo korištenjem zemljišta na kojem je građen solarni dimnjak, kao obradivu površinu za uzgoj hrane. U sljedećem poglavlju detaljnije će se proći kroz izvedbe koje nastoje ukloniti nedostatke solarnih dimnjaka.

3. Struktura i elementi solarnih dimnjaka

3.1. Kolektor

Kolektor je naziv za dio solarnog dimnjaka zadužen za zagrijavanje zraka koji se nalazi u njemu, pomoću efekta staklenika. Pokrov kolektora napravljen je od materijala koji propuštaju svjetlost, poput stakla ili plastičnog filma. Pomoću svjetlopropusnih materijala, sunčeve zrake prolaze kroz pokrov te zagrijavaju zrak ispod pokrova kao i tlo. Kako se zrak zagrijava, tako mu se gustoća smanjuje i on postaje lakši te se uslijed razlike tlaka na početku kolektora (veći tlak, gušći zrak) i tornja (manji tlak, rjeđi zrak), kreće prema tornju. Porastom ozračenosti, temperatura i brzina zraka linearno rastu. [6]

Povećanjem površine kolektora povećava mu se učinkovitost. Kako bi se maksimalno iskoristila površina tla koju zauzima, moguće je postaviti kolektor pod nagibom prema tornju. Ovim postupkom efektivna površina kolektora se povećava, kao i učinkovitost solarnog dimnjaka. Međutim, povećavanjem nagiba strujanje zraka postaje sve više turbulentno. Uslijed turbulencija brzina strujanja se smanjuje. [7]



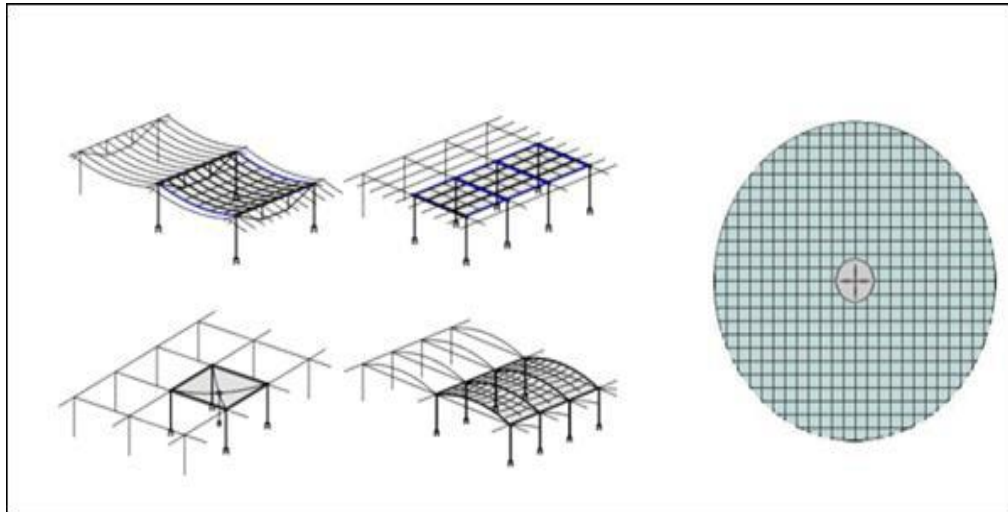
Sl. 3.1. Turbulencije u kolektoru – usporedba pri nagibu od 0° (gore) i $1,469^\circ$ (dolje) [7]

Pri nagibu kolektora od samo $0,5^\circ$, učinkovitost kolektora povećava se za 10 %. Povećanjem nagiba na 5° , snaga solarnog dimnjaka se povećava za otprilike četiri puta. [8]

Problem kolektora kod SCPP-ova je skupljanje prašine na pokrovu, što je posebno nezgodno kada se u obzir uzme da su preporučena područja izgradnje suha, pustinjska područja.

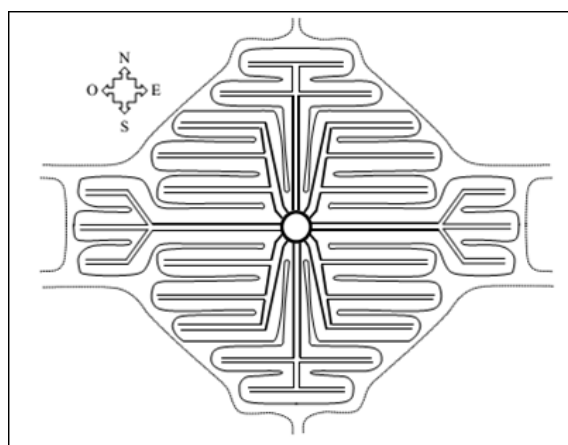
Haaf je u [9] naveo probleme izabrane lokacije, a to su velike brzine vjeta koje uzrokuju dizanje velike količine prašine te iskop šljunka udaljen 2 km od postrojenja. Vjetar je nosio prašinu od mjesta iskopa te pravio oblake prašine koji su prekrivali postrojenje. Prašina, koju kiša nije mogla sprati, se nakupljala na kolektoru te spustila učinkovitost kolektora za 12 %.

Izvedba kolektora ovisi o tipu *SCPP*-a, a najčešće su jednostave, lake konstrukcije, koje koriste čelične šipke i zateznu užad kako bi formirali ćelije pravokutnog ili kvadratnog oblika. [2]



Sl. 3.2. Konstrukcija kolektora *SCPP*-a [2]

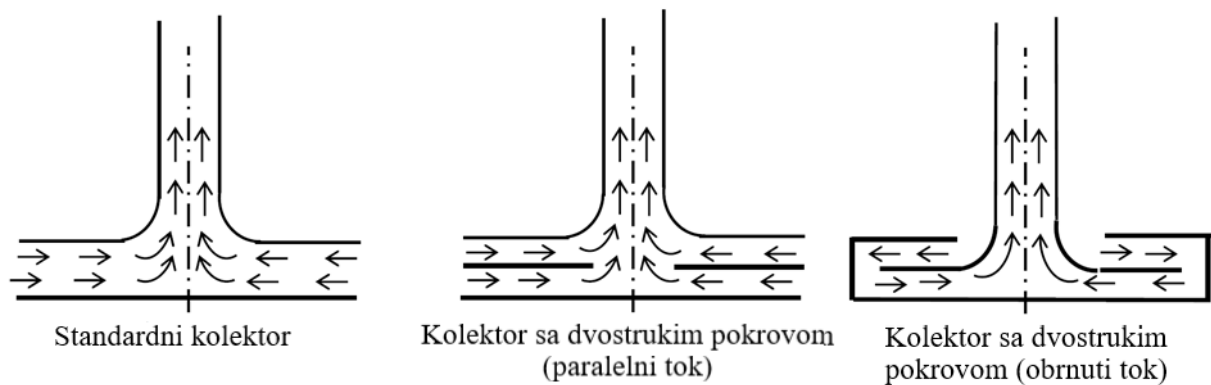
U kolektor se mogu ugraditi i pregrade. Ove pregrade povećavaju učinkovitost *SCPP*-a, sa najvećim povećanjem proizvedene električne energije od 19,1 %. Povećanjem broja pregrada povećava se i učinkovitost, sa optimalnim brojem pregrada od 12. [10]



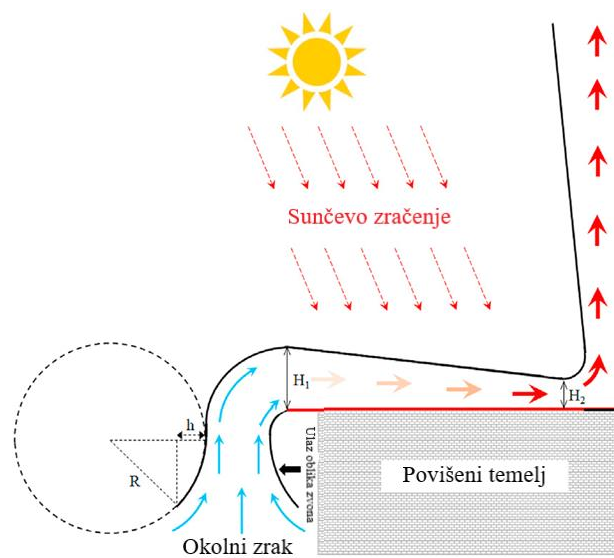
Sl. 3.3. Membranska konstrukcija kolektora predložena od D. Bonelle-ija [2]

D.Bonelle-i predložio je alternativnu izvedbu kolektora. Konstrukcija kolektora je membranska, sa parcijalnim odvajanjem funkcija kolektora, a to su prikupljanje topline i dovođenje toplog zraka u toranj.

Kolektorski pokrov može se razlikovati i po slojevima, odnosno može biti višeslojni. Kolektori sa dvostrukim pokrovom mogu, za neznajno veću investicijsku cijenu, proizvesti do 40 % više električne energije po godini. [11]



Sl. 3.4. Vrste kolektorskih pokrova [8]



Sl. 3.5. Kolektor sa ulazom u obliku zvona [12]

Osim oblika kolektora, moguće je ulaz kolektora napraviti u obliku zvona. Ovaj oblik povećava učinkovitost *SCPP*-a za 33 % sa pretpostavkom da utjecaj vanjskih faktora poput vjetrova minimizira ili uklanja. Problem ove izvedbe je potreba za gradnjom dimnjaka na povišenom temelju. [12]

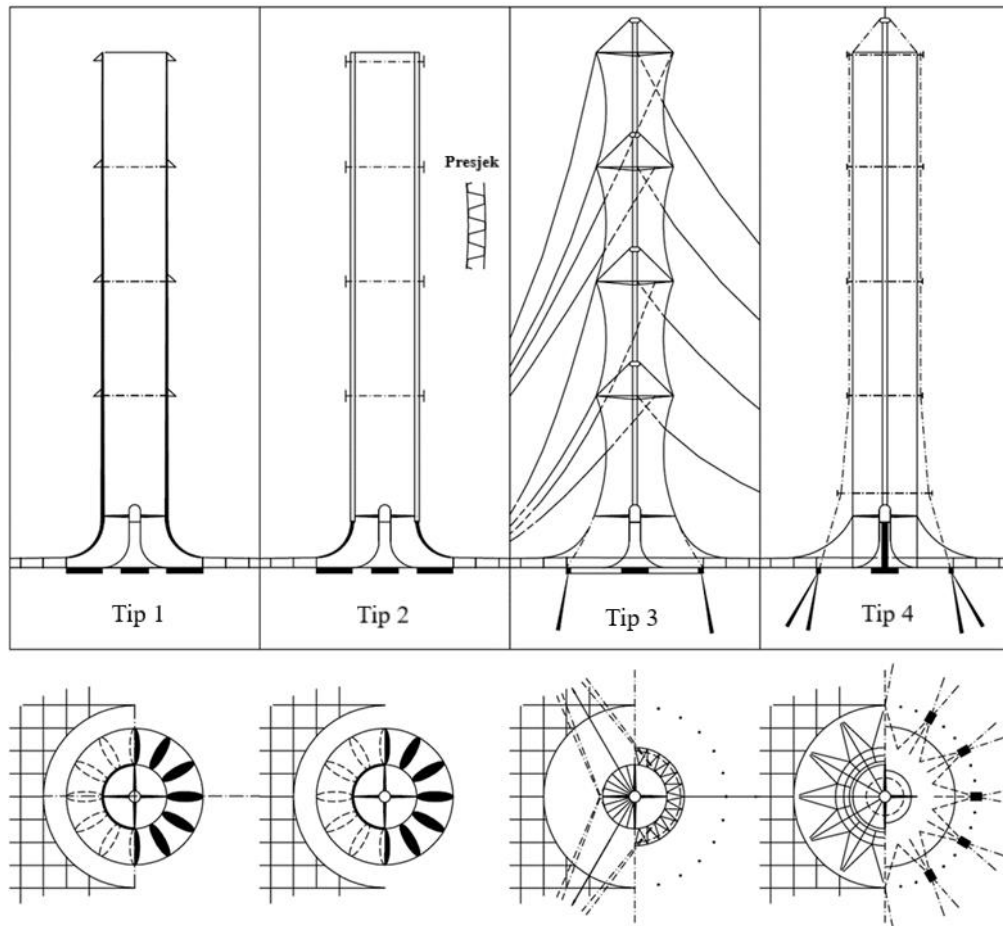
3.2. Toranj

Toranj, odnosno *dimnjak*, središnji je dio *SCPP*-a. Svrha tornja je stvoriti razliku temperature, pomoću koje se stvara efekt dimnjaka po kojem je, uz njegov izgled, dobio naziv. Efekt dimnjaka opisuje uzgon toplog zraka prema gore uslijed razlike temperature u dimnjaku i temperature okoline. Izlaskom zraka iz dimnjaka stvara se praznina odnosno vakuum, koji svježi zrak iz okoline popunjuje, te se ciklus zatvara.

Pri dnu dimnjaka nalazi se turbina, te je važno da dimnjak omogući što veću razliku između temperature okoline na kraju dimnjaka i temperature kod kraja kolektora. Ako toranj ne bi postojao, razlika temperature okoline i izlaza turbine bila bi približna nuli te bi učinkovitost turbine pala uslijed usporavanja zraka ili povratka zraka ako tlak nije dovoljno visok, uz znatan utjecaj vremenskih pojava poput vjetrova.

Povratak zraka može nastupiti i kada je toranj previše visok. Visina tornja može znatno ovisiti o vremenskim prilikama odnosno području u kojem se *SCPP* gradi, npr. na velikim nadmorskim visinama zrak je hladniji te je poželjnije imati niži toranj nasprem manjih nadmorskih visina. Ulaz zraka kroz izlaz dimnjaka može smanjiti toplinsku učinkovitost *SCPP*-a za 20 - 30 %. Ovaj problem također može nastati ako je promjer dimnjaka prevelik, temperatura u okolini opadne ili puše jak vjetar. [8]

Postoji mnogo vrsta tornjeva međutim za razliku od kolektora, gdje je najvažnija učinkovitost, gleda se ekonomičnost. Većina izvedbi tornjeva koristi se čeličnim cilindrima ili betonom, sa maksimalnom visinom od oko 1 km. Prema [13], na sljedećoj slici su prikazana četiri najčešće korištena tipa konstrukcije tornja: Tip 1 – čisti betonski toranj, Tip 2 – toranj sa trapezoidnim limom između dva limena cilindra, sa betonskom bazom, Tip 3 – membranski toranj, Tip 4 – limeni toranj sa zateznim kabelima.



Sl. 3.6. Tipovi tornjeva [13]

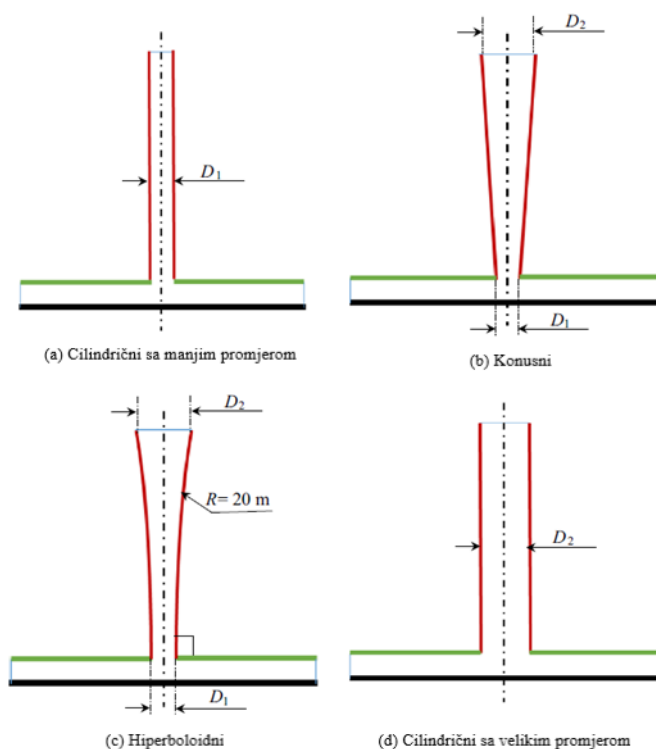
Prema J. Schlaichu, preporuka je koristiti armirani beton kao isplativu opciju za gradnju a rezultat bi bio toranj sa vijekom trajanja do 100 godina. [14]

Osim različitih materijala i same konstrukcije tornjeva, može ih se podijeliti i prema obliku tornja. Na slici 3.7. prikazani su konvergentni i divergentni tornjevi.



Sl. 3.7. Konvergentni (lijevo) i divergentni (desno) oblik tornja [14]

Razni oblici tornjeva su se u znanstvenim radovima analizirali pomoću *CFD* (prema eng. *Computational Fluid Dynamics*) simulacija. Nasraoui et al. [15] analizirao je cilindrični, konusni i hiperboloidni oblik pomoću *ANSYS Fluent-a*.



Sl. 3.8. Analizirani oblici tornjeva [15]

Rezultati simulacije pokazali su da hiperboloidni oblik tornja, sa omjerom $D_2/D_1 = 8$, povećao učinkovitost za 295 %, a konusni za 250 %, nasprem cilindričnog oblika sa malim promjerom.

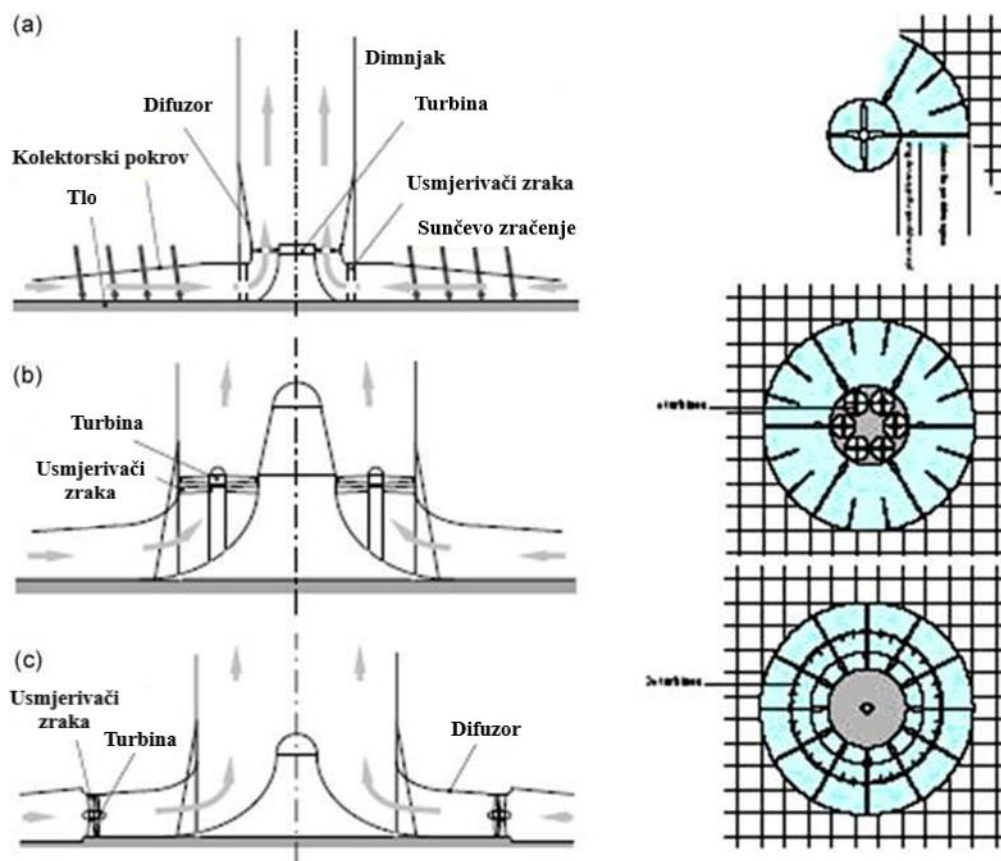
Semai et al. analizirao je ponašanje *SCPP-a* za različite nagibe tornja, sa i bez dodatne pohrane toplinske energije. Zaključak je da pri nagibu od 22° , *SCPP* ima najveću učinkovitost međutim, kada se uvede dodatna pohrana topline, manji nagib je poželjniji kako bi se osigurala veća učinkovitost u kontinuiranom načinu rada. [16]

3.3. Turbina

Nalazi se pri dnu tornja ponaša se isto kao i normalna, aksijalna vjetroturbina, sa zadatkom pretvaranja kinetičke energije vjetra u mehaničku te, pomoću generatora uparenog sa vratilom

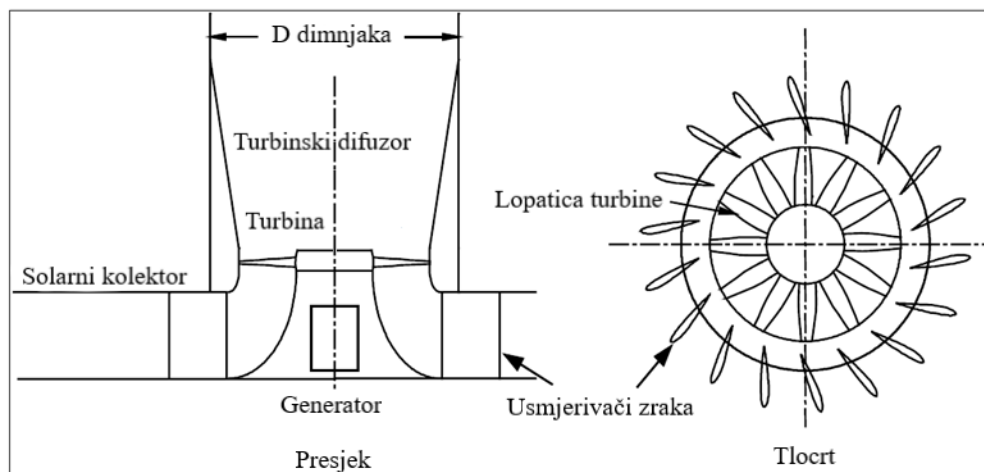
turbine, električnu energiju. Glavne razlike između ove vrste turbine i vjetroturbine na otvorenom su učinkovitost, varijacije u brzini vjetra i pad tlaka. Budući da je turbina cijevna, gdje zrak može prolaziti samo kroz turbinu, teorijska učinkovitost je 100 % Betzovog limita. Osim učinkovitosti, zbog konstrukcije dimnjaka također se omogućuje stabilna brzina strujanja koja se ne može brzo promijeniti uslijed velikog volumena zraka koji se nalazi u kolektoru. Zadnja razlika je znatan pad tlaka u turbini SCPP-a, koja je otprilike 10 puta veća od vjetroturbine na otvorenom. [2]

Za razliku od normalnih vjetroturbina koje se razlikuju samo po promjeru rotora, broju lopatica i mehanizmu kontrole brzine vrtnje, kod SCPP-ova varira broj turbina i njihov položaj, a mogu se izgraditi i difuzor kao i usmjerivači zraka (eng. *guide vanes*). Na slici su prikazane tri vrste konfiguracija turbina: (a) jednostruka turbina, (b) više manjih, vertikalnih turbina, (c) više manjih, horizontalnih turbina.



Sl. 3.9. Konfiguracije turbina [2]

Bitno je naglasiti da sve prikazane konfiguracije imaju ugrađen difuzor i usmjerivače zraka, što većinom nije slučaj.



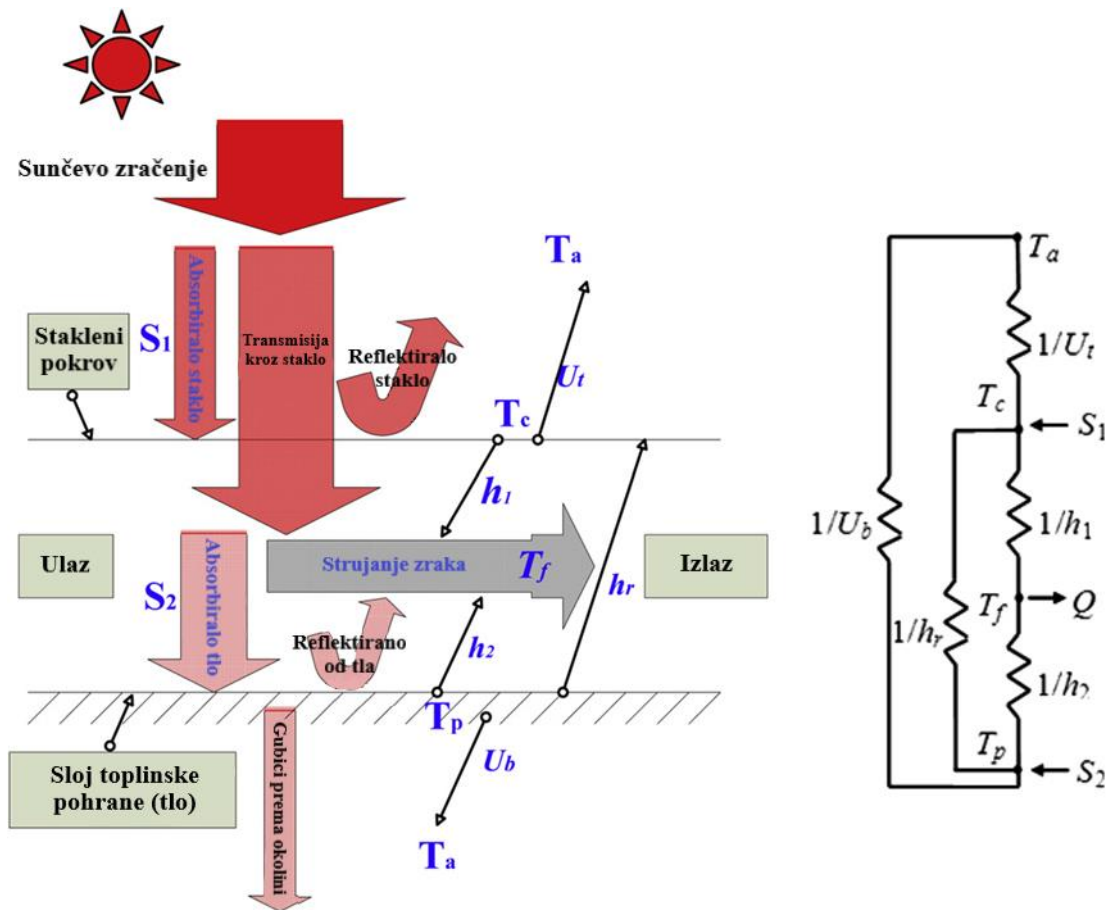
Sl. 3.10. Difuzor i usmjerivači zraka [17]

Difuzori služe kako bi se tlak što više smanjio pri izlasku iz turbine. Smanjenjem tlaka stvara se vakuum koji dodatno uvlači zrak kroz turbinu i povećava učinkovitost. Kako bi se povećala učinkovitost bitno je projektirati turbinu sa optimalnim padom tlaka. Početna pretpostavka za optimalni pad tlaka u turbini je $2/3$, međutim ta pretpostavka vrijedi samo za slučaj kada je pad tlaka konstantan. Daljnja istraživanja su utvrdila da se optimalni pad tlaka kreće od $0,8 - 0,9$. [18]

Usmjerivači zraka služe za navođenje zraka na lopatice turbine, pod kutem, koji ovisi o brzini strujanja zraka kroz turbinu.

3.4. Tlo i pohrana energije

Kolektor se služi efektom staklenika kako bi zarobio toplinu između tla i kolektorskog pokrova. Kako je pokrov proziran, tako je moguće Sunčevim zrakama da prođu kroz njega te ih tlo parcijalno absorbira a ostatak re-emitira kao infracrvene zrake. Infracrvene zrake su visokofrekvencijske te ne mogu prolaziti kroz materijale poput stakla, stoga se reflektiraju od pokrov natrag u okolinu. IC zrake koje tlo re-emitira se odbijaju natrag od kolektorski pokrov prema tlu te se proces ponavlja sve dok potpuno ne izgube energiju. [14]

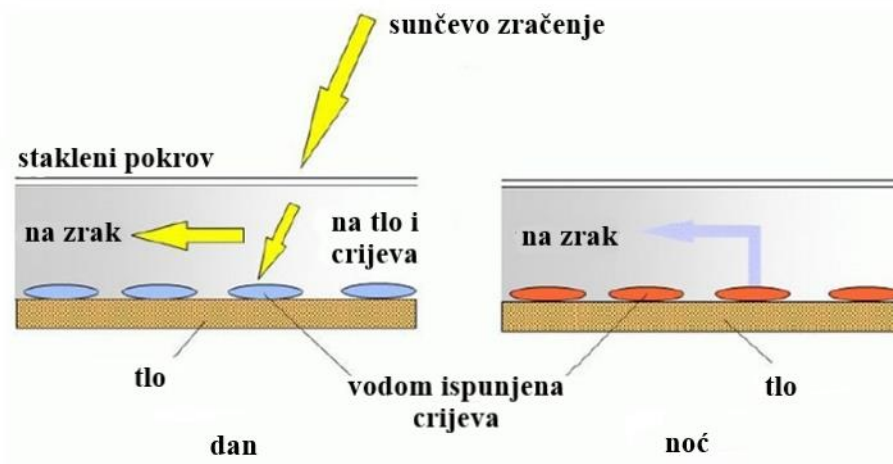


Sl. 3.11. Toplinska bilanca u solarnom kolektoru [19]

Reflektivnost tla, toplinska provodnost kao i toplinski kapacitet, ovise o sastavu tla. Općenito, najpovoljnije karakteristike tla su što manja reflektivnost, kako bi tlo moglo primiti što više toplinske energije od sunčevih zraka, što veći toplinski kapacitet kako bi tlo moglo kondukcijom zagrijavati okolni zrak kada temperatura zraka padne te što manja toplinska provodnost kako se toplinska energija ne bi previše brzo disipirala. Ako je tlo odgovarajućeg sastava moguć je rad dimnjaka i noću, čak i neprestani rad dimnjaka, bila noć ili dan. Cijena rada noću je smanjena proizvodnja električne energije tijekom sunčanog vremena budući da tlo prvo mora absorbirati dovoljno energije kako bi mu se temperatura povisila na razinu dovoljnu za zagrijavanje okolnog zraka. Dodatna prednost odgovarajućeg tla je smanjenje naglih promjena proizvodnje električne energije u slučaju promjene vremenskih uvjeta.

Druga opcija, ako se ne želi ili ne može promijeniti sastav tla, je postaviti crijeva ispunjena vodom. Ona služe istoj svrsi kao i prethodno, a to je spremanje toplinske energije tijekom sunčanog

vremena kako bi se koristila u vremenu kada je sunčevo zračenje manjkavo ili je noć. Cijevi se postavljaju na tlo koje je prebojano crnom bojom ili postavljeno na crne limene ploče. [14]



Sl. 3.12. Pohrana energije pomoću vodom napunjenih crijeva [2]

Pohrana energije može se vršiti i pomoću solarnog jezera. Solarno jezero služi se slanom otopinom kako bi pohranilo sunčevu odnosno toplinsku energiju u slojevima. Svaki fluid koji se zagrijava iz jednog izvora, bez miješanja, se dijeli u slojeve po temperaturi. Kako zagrijavanjem fluidi postaju lakši, odnosno gustoća im se smanjuje, tako molekule sa više energije izbijaju na površinu dok su niži slojevi hladniji, gušći i sadrže manju toplinsku energiju. Solarno jezero služi se visokom gustoćom i toplinskim kapacitetom slane otopine kako bi se efektivno razdvojili energetske slojevi. Umjesto da se toplinska energija pomiče prema površini te predaje toplinu okolini, ostaje zarobljena ispod sloja vode. Temperature na dnu jezera pomoću ove metode mogu dosegnuti 100 °C. [20]

3.5. Namjena solarnih dimnjaka

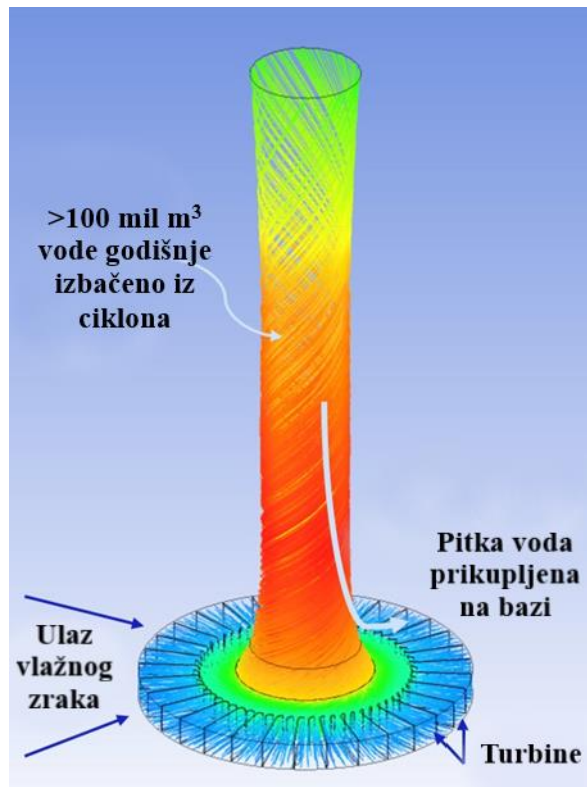
Osnovna svrha *SCPP*-a je proizvodnja električne energije. Ove elektrane zauzimaju značajnu površinu te imaju nisku učinkovitost stoga se istražuju dodatne koristi osim proizvodnje električne energije, kako bi se nadoknadili ovi nedostaci.

Najproširenija izvedba *SCPP*-ova sa dodatnim ulogama je proizvodnja električne energije u kombinaciji sa pretvaranjem tla kod kolektora u obradivu površinu čime se efektivno dobije staklenik. Ovim postupkom mogu se inače neobrađive površine poput pustinja, učiniti korisnima. [21]



Sl. 3.13. Pilotno postrojenje u Manzanaresu, kolektor [5]

Jedan od koncepata solarnog dimnjaka spaja proizvodnju električne energije i prikupljanje vode iz vlažnoga zraka. Ovaj koncept omogućuje dostavljanje vode sušnim područjima, poput Australskih naselja. Australaska tvrtka *Enviro Mission* dizajnirala je tzv. Solarni ciklonski toranj. Osim proizvodnje električne energije, solarni ciklonski toranj prikuplja preko 100 milijuna m³ vode iz vlage u zraku. Prikupljanje vode vrši se pomoću centrifugalne sile tako što se zrak u tornju usmjerava u vrtlog te se molekule vode, koje su teže od zraka, kreću prema rubu tornja te padaju na dno, gdje se prikupljaju. [22]



Sl. 3.14. Princip djelovanja solarnog ciklonskog tornja [22]

Osim ova dva koncepta postoje i drugi, manje važni koncepti, poput solarnog sušila ili desalinizacije vode.

3.6. Vrste tehničkih izvedbi

- Konvencionalna:

Solarni dimnjaci bazirani na konceptu pilotnog postrojenja u Manzanaresu. Oni imaju centralni toranj u čijem se podnožju nalaze turbina/e i generator, te kolektor koji okružuje toranj a može biti vodoravan ili blago nakošen prema tornju.

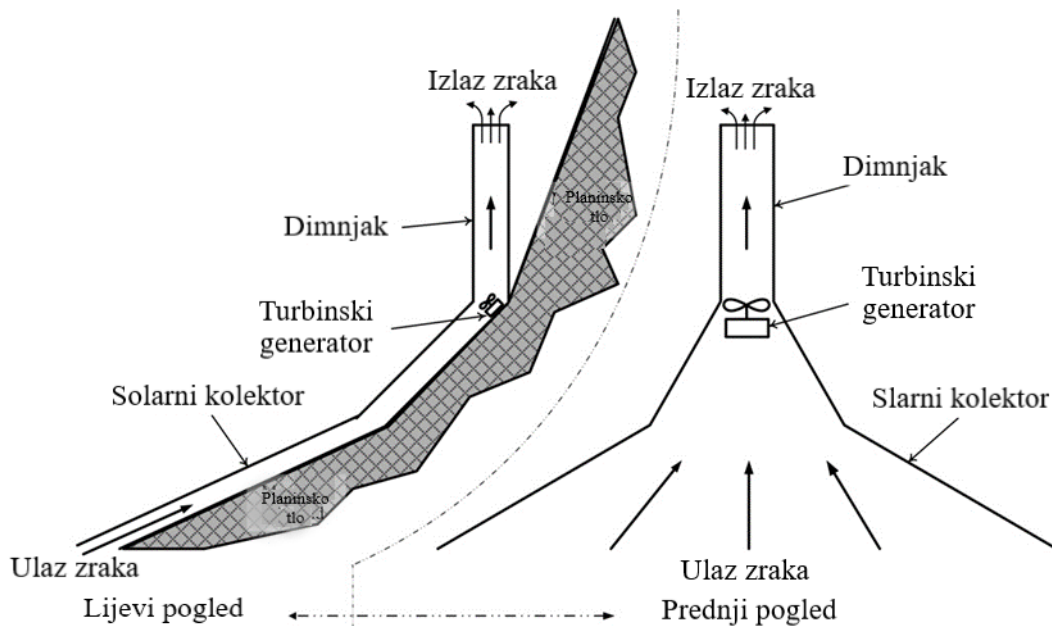


Sl. 3.15. Pilotno postrojenje u Manzanaresu, Španjolska [5]

- Solarni dimnjak na padini:

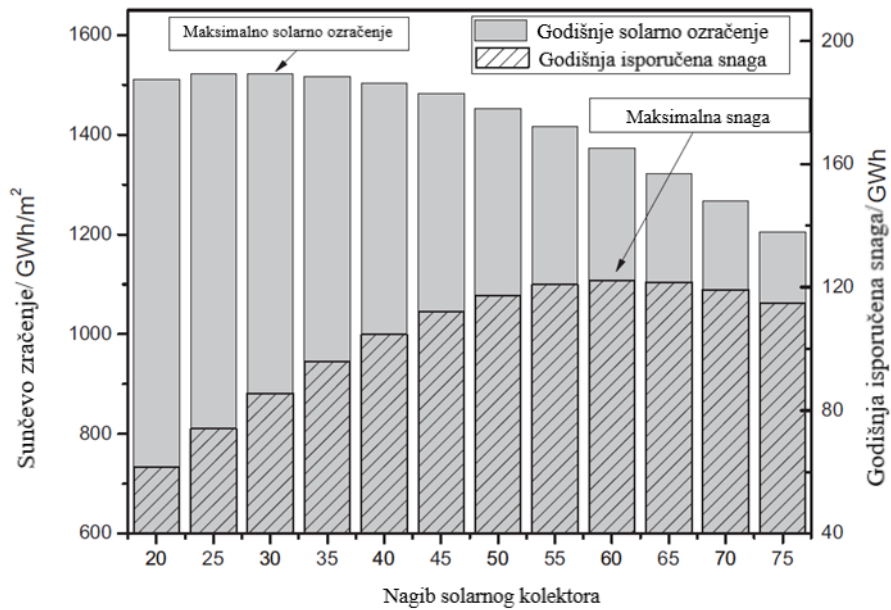
Izgradnja solarnih dimnjaka nije ograničena samo na suhe predjele gdje je godišnja ozračenost visoka već se mogu postaviti i u hladnije predjele. Kako se ne može postići visoka razlika temperature između zraka u kolektoru i okoline, odnosno razlika tlaka, moraju se napraviti preinake. Postavljanjem solarnog dimnjaka na padinu brda ili planine, kolektor prati nagib padine te se zagrijani zrak može lakše kretati prema tornju budući da se topliji zrak prirodno uzdiže vertikalno. [19]

Koncept su predložili Bilgen i Rheault 2005. sa zaključkom da je ova vrsta dimnjaka pogodnija za planinska područja i područja na višim geografskim visinama. [19]



Sl. 3.16. Solarni dimnjak na padini [19]

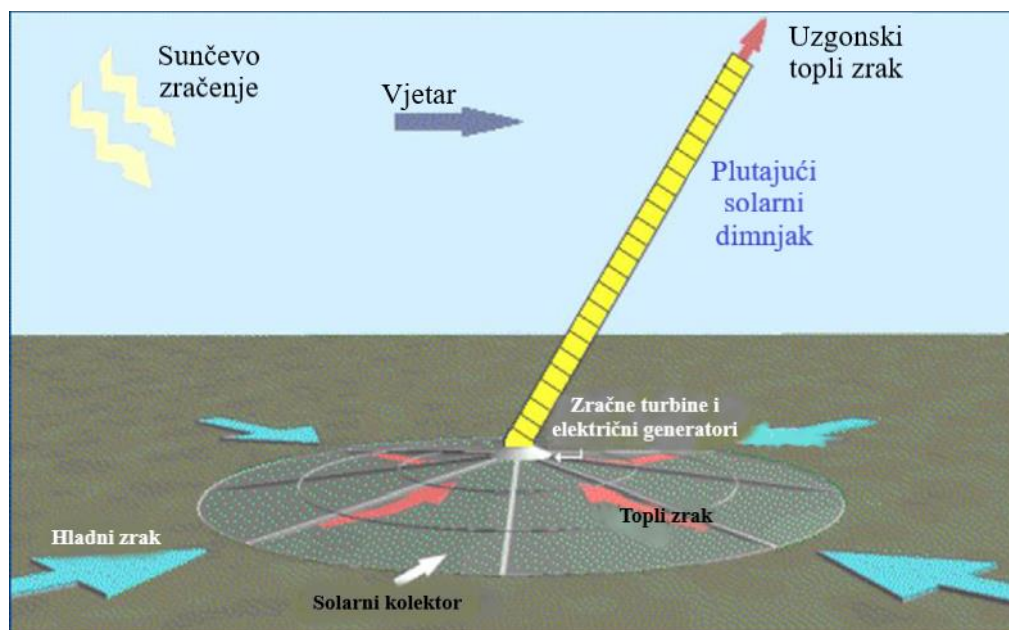
Istraživanja ove vrste dimnjaka su pokazala da su za razliku od konvencionalnih solarnih dimnjaka, koji imaju najbolje performanse ljeti, najpogodnija godišnja doba proljeće i jesen. [23] Cao et al. ova je istraživanja potvrdio usporedbom konvencionalnih solarnih dimnjaka sa solarnim dimnjacima na padini koji imaju nagib od 30 i 60 stupnjeva, te zaključio da konvencionalni solarni dimnjaci imaju simetrične performanse tijekom godine u odnosu na godišnja doba, dok solarni dimnjaci na padini imaju poboljšane performanse zimi ali ljeti one opadaju. Autor je također komentirao kako se za nagib od 30 stupnjeva javlja najveće ozračenje kolektora međutim najveća proizvodnja električne energije je pri nagibu od 60 stupnjeva. Razlog je naveden da ozračenje nije najvažniji parametar kod solarnih dimnjaka, već maseni protok kroz turbinu. [19]



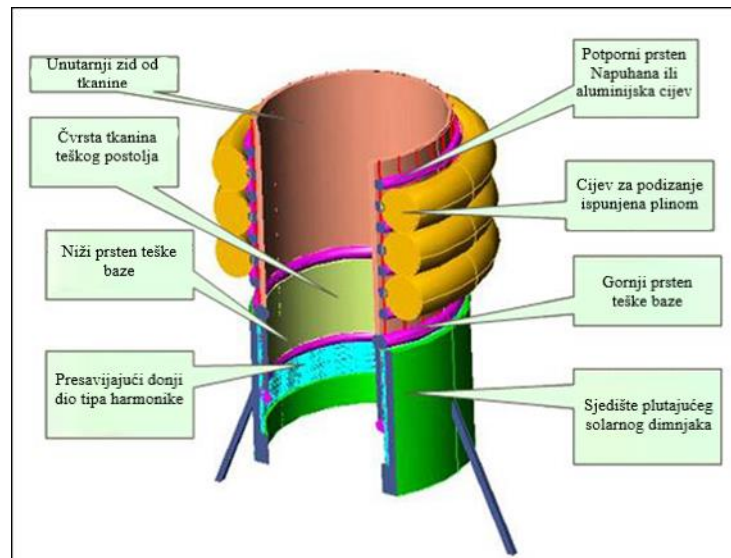
Sl. 3.17. Odnos između nagiba kolektora, godišnjeg ozračenja kolektora i godišnje proizvodnje solarnog dimnjaka [19]

- „Plutajući“ solarni dimnjak:

Ovaj dimnjak ima istu izvedbu kolektora kao i kod normalnih *SCPP*-ova međutim, toranj nije krut već fleksibilan. Zbog prstenja ispunjenih plinom lakšim od zraka, koji služe za potporu dimnjaka, nije potrebno koristiti klasične materijale poput armiranog betona. [11]



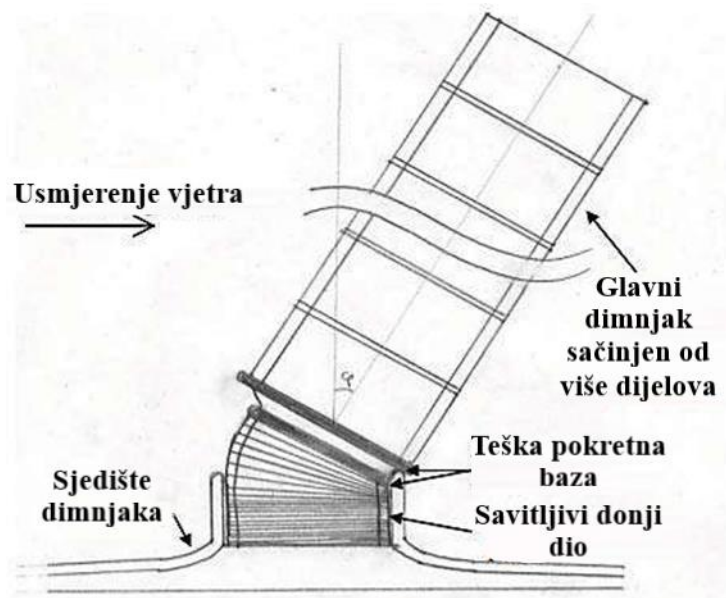
Sl. 3.18. Plutajući solarni dimnjak [5]



Sl. 3.19. Konstrukcija tornja kod plutajućeg solarnog dimnjaka [2]

Osim što je moguće dosegnuti veću visinu tornja naspred drugih tipova *SCPP*-ova, investicijski trošak je 5 do 6 puta manji a površina kolektora 4 do 10 puta manja, za istu snagu. Također se smanjuje i trošak logistike i gradnje visokog tornja. [11, 24]

Baza tornja je fleksibilna i može se pomicati ovisno o nagibu tornja koji se nagnje u smjeru puhanja vjetra. Sastoji se od sjedišta, donjeg dijela dimnjaka koji se može savijati i gornjeg dijela koji je krut i pomiče se zajedno sa tornjem.

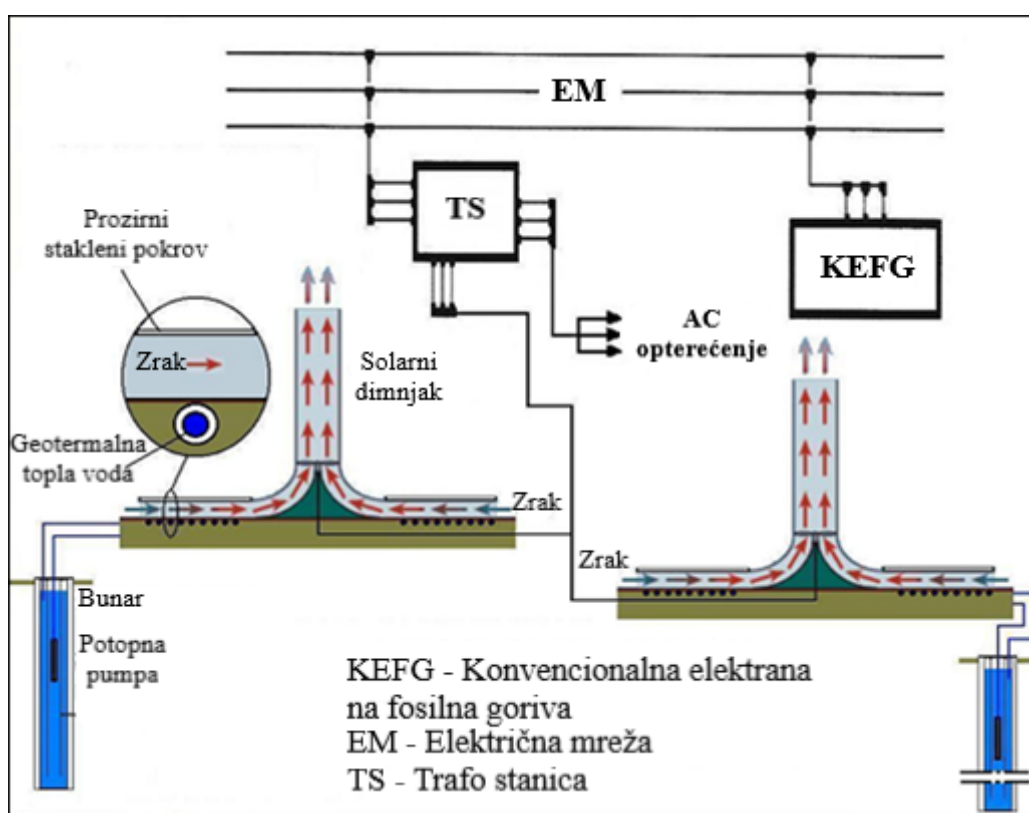


Sl. 3.20. Baza plutajućeg solarnog dimnjaka [14]

- Hibridni solarni dimnjak:

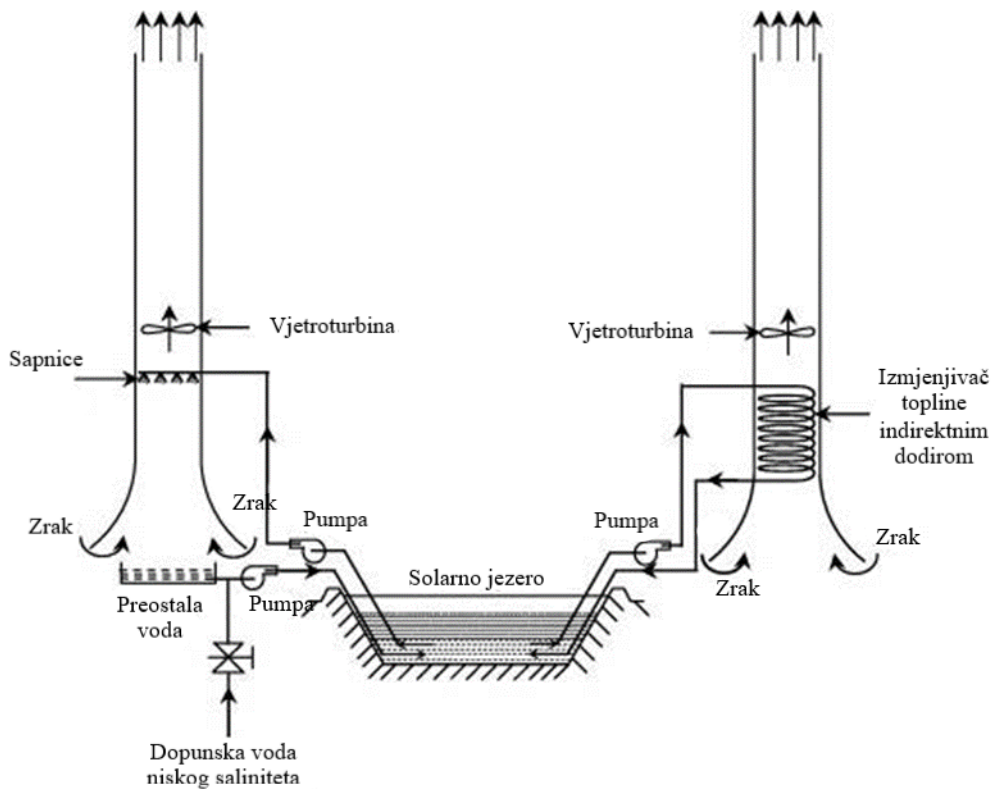
SCPP-ovi koji osim normalnog pogona pomoću sunčeve energije koriste i dodatni izvor energije, poput geotermalne energije ili recikliranja toplinske energije.

Geotermalni dimnjaci služe se geotermalnom energijom i vodom kao medijem kako bi smanjili potrebnu toplinu za zagrijavanje zraka u kolektoru. Bunari sadrže vodu koja prikuplja geotermalnu energiju a zatim topla voda pomoću pumpe cirkulira cijevima koje se nalaze neposredno ispod zemlje gdje se nalazi kolektor. Prolaskom vode kroz cijevi, ona predaje toplinsku energiju zraku u kolektoru te se hladi i cirkulira natrag u bunar te se krug zatvara. Pomoću geotermalne energije omogućen je rad SCPP-a i noću.



Sl. 3.21. Princip djelovanja geotermalnog solarnog dimnjaka [2]

Druga vrsta hibridnog solarnog dimnjaka je solarni dimnjak sa solarnim jezerom. Gornji sloj slane otopine crpi se i koristi u izmjenjivaču topline koji se nalazi u tornju ili se pomoću sapnica raspršuje u toranj. Otopina se nakon predaje topline vraća na dno jezera te se postupak ponavlja.

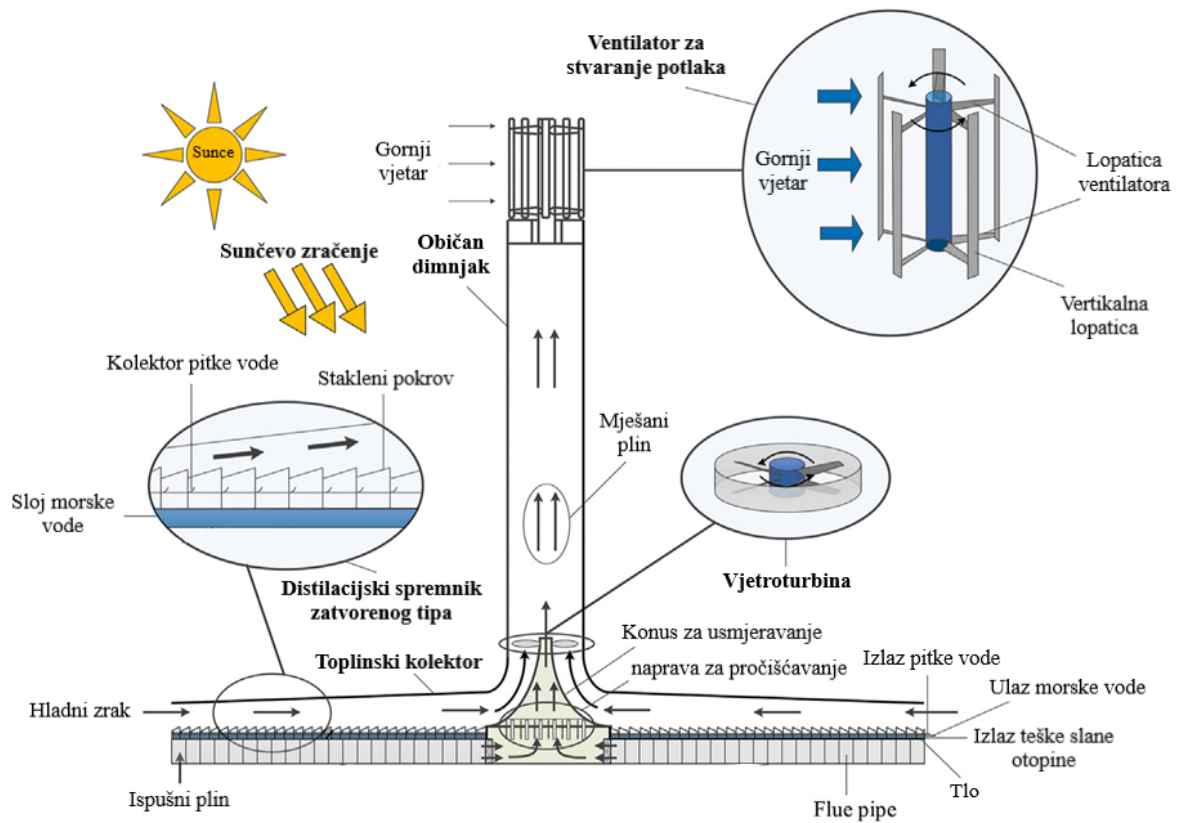


Sl. 3.22. Princip djelovanja solarnog dimnjaka sa solarnim jezerom [2]

- Solarni dimnjak sa ventilatorom za stvaranje podtlaka:

Razlika tlaka između ulaza i izlaza solarnog dimnjaka temelj je njegovog djelovanja. Što je niži tlak na izlazu to je veća brzina strujanja zraka a time i maseni protok. Ovaj solarni dimnjak služi se vanjskim vjetrom kako bi dodatno smanjio tlak na izlazu tornja pomoću ventilatora postavljenog na vrh tornja. Zuo et al. [25] osmislio je ovu vrstu dimnjaka sa temeljem na istraživanjima Ming et al. [26], gdje se analizirao utjecaj vjetra pri raznim brzinama te se zaključilo da vjetar brzine 15 m/s ili više, ima pozitivan učinak na solarni dimnjak. Drugo istraživanje provodio je Li et al. [27] a bilo je vezano za korištenje vjetra u tzv. *tornado-tornju* te se zaključilo da kombiniranjem *tornado-tornja* sa *SCPP*-om, proizvodnja električne energije može znatno porasti.

Zuo et al. je u [25] kombinirao *SCPP* sa ventilatorom za stvaranje podtlaka, sa desalinizacijom vode, a u kasnijem radu [28], analizirao ekonomsko stajalište uparenja ovoga dimnjaka sa desalinizacijom i korištenjem otpadne topline.



Sl. 3.23. Princip djelovanja SCPP-a sa ventilatorom za stvaranje podtlaka kombiniranim sa desalinizacijom i korištenjem otpadne topline [28]

4. Modeliranje solarnog dimnjaka

Kako bi se započelo sa modeliranjem solarnog dimnjaka, prvo je potrebno provesti analizu parametara solarnog dimnjaka. Analiza uključuje parametre vezane za sam oblik i dimenzije solarnog dimnjaka kao i ulazne i izlazne veličine te njihov međusobni odnos.

Kao temelj za izradu makete solarnog dimnjaka potrebno je poznavati osnovne principe kojima se koristi, kao i sve parametre koje je potrebno uzeti u obzir. Kako bi se olakšao izračun i izrada 2D/3D modela, koristili su se CAD (eng. *Computer Assisted Design*) i CFD programi, čiji su rezultati potkrijepljeni raznim istraživanjima i rezultatima CFD simulacija drugih autora.

Glavni princip solarnog dimnjaka je princip uzgona, koji se postiže zagrijavanjem zračne mase u kolektoru. Uslijed razlike tlaka zagrijani zrak, koji je rjeđi, pokreće se prema tornju te se pomoću uzgona uzdiže u tornju i izlazi u okolinu. Pri prolasku zraka vrijede jednačbe kontinuiteta, momenta i očuvanja energije. [7]

4.1. Analiza inicijalnih parametara

Solarni dimnjaci sa većom učinkovitosti imaju sljedeću geometriju:

- ulaz kolektora je što niži, kako bi se izbjegli toplinski gubici i smanjio utjecaj vjetra
- površina kolektora je što veća, preferabilno sa nagibom i dvostrukim pokrovom
- toranj je što viši sa što manjim promjerom te divergentnog oblika
- kolektor ima pregrade [8, 29]

Za izradu makete promjer kolektora i visina tornja odabrani su prema proporcijama pilotnog postrojenja u Manzanaresu. Zbog preinaka i ograničenja na fizičkom modelu, odabrane su sljedeće dimenzije:

Tablica 4.1. Dimenzije pilotnog postrojenja i makete

	Visina tornja, H [m]	Promjer tornja, d [m]	Polumjer kolektora, r [m]	Visina ulaza kolektora, h [m]	H/d	H/r	h/r
Manzanares	195	10	122	2	19,5	1,6	0,016
Maketa	0,5	0,05	0,375	0,005	10	1,33	0,013

Nagib kolektorskog pokrova odabran je prema [8], a iznosi 5°. Oblik pera i prijelaza između kolektora i tornja odabrani su prema rezultatima simulacije u Siemens Simcenter Star CCM+, CFD simulacijskom programu.

Ozračenje je uzeto kao konstantno, iznosa 1000 W/m^2 , pri vanjskoj temperaturi od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ i brzinom vjetra od 0 m/s .

4.2. Izrada matematičkog modela

Za izradu matematičkog modela potrebne su prethodno navedene jednačbe:

- kontinuiteta
- momenta
- energije

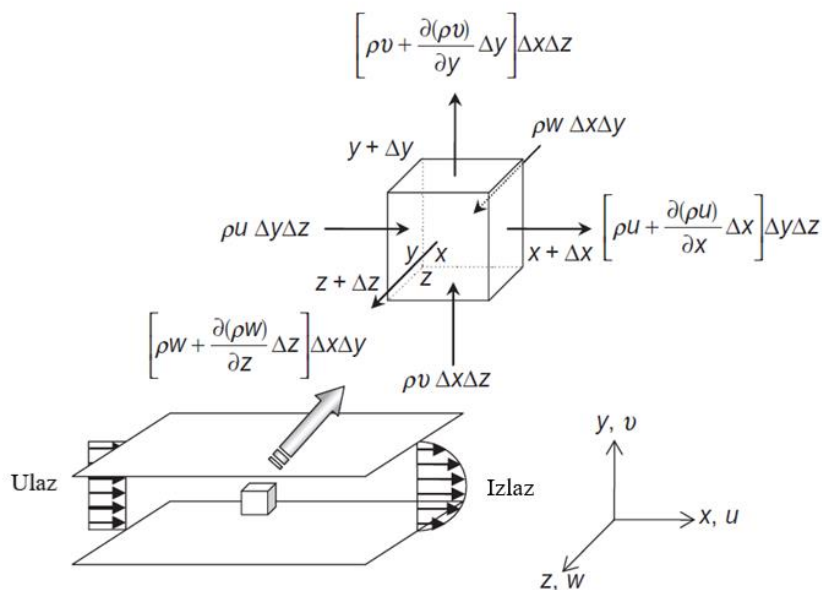
Jednačba kontinuiteta zasniva se na zakonu očuvanja mase, a to je da masa ne može nastati niti nestati. Za slučaj kontinuiteta, ulazna masa mora biti jednaka izlaznoj. Jednačba kontinuiteta za fluide u kartezijskom koordinatnom sustavu glasi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4-1)$$

Gdje su:

- u, v, w – lokalne brzine na osi x, y, z ; funkcije lokacije, x, y, z i vremena, t
- ρ – gustoća fluida

Ovaj izraz vrijedi za prolaz fluida kroz infinitezimalni kontrolni volumen u kartezijskom koordinatnom sustavu.



Sl. 4.1. Konzervacija mase u infinitezimalnom kontrolnom volumenu fluida koji prolazi između dvije stacionarne, paralelne ploče [30]

U slučaju da je brzina na izlazu kontrolnog volumena veća nego na ulazu za npr. y os, odnosno $\partial v / \partial y > 0$, onda se razlika protoka mase mora nadoknaditi na drugim osima tako što se smanji brzina na ulazu, čime derivacija postane manja od nule. Suma svih ulaznih i izlaznih brzina odnosno masenog protoka mora biti jednaka nuli. [30]

Prebacivanjem jednadžbe u 2D osnosimetrični sustav, dobije se jednadžba kontinuiteta za cilindrični sustav sa osi $y = f(r)$:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (4-2)$$

Jednadžba momenta zasniva se na drugom Newtonovom zakonu koji opisuje djelovanje sile na tijelo:

$$\sum F = ma \quad (4-3)$$

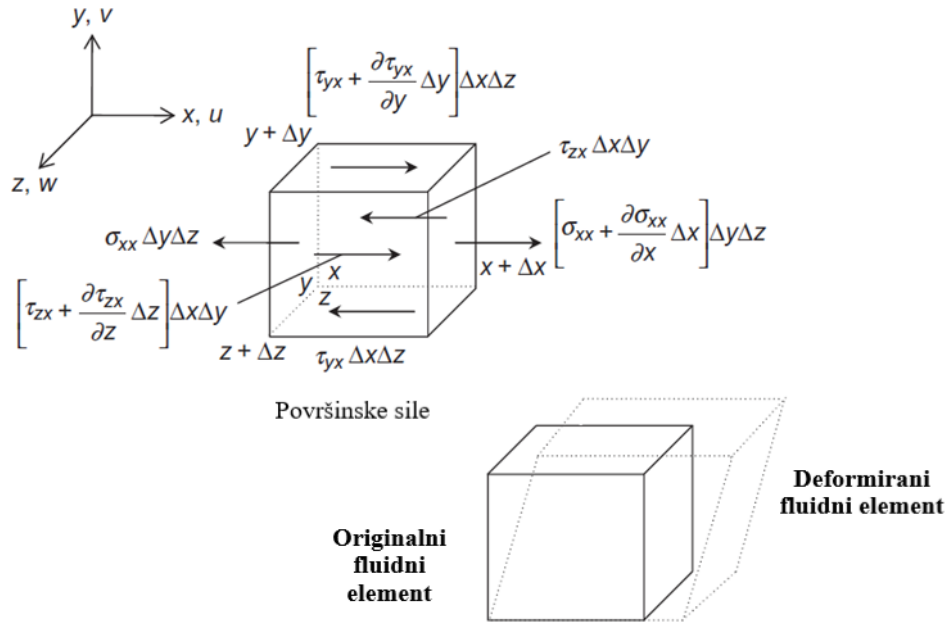
Za 2D sustav gdje su gustoća i viskoznost fluida konstantni mogu se koristiti Navier-Stokes jednadžbe:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (4-4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}, \quad (4-5)$$

gdje su:

- p – tlak
- ν – kinematička viskoznost; omjer dinamičke viskoznosti, μ i gustoće fluida, ρ



Sl. 4.2. Djelovanje površinskih sila na infinitezimalni kontrolni volumen i njegova deformacija [30]

Na kontrolni volumen djeluju normalna sila, σ i tangencijalna sila τ , koje uzrokuju deformaciju fluidnog elementa.

Prebacivanjem jednadžbi u 2D osnosimetrični, cilindrični sustav, dobiju se izrazi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u u)}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho u v)}{\partial r} = & -\frac{\partial}{\partial y} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + (\rho_0 - \rho) g, \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u v)}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v v)}{\partial r} = & -\frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2\mu \frac{v}{r^2}, \end{aligned} \quad (4-7)$$

Jednadžba (očuvanja) energije temelji se na prvom zakonu termodinamike, koji povezuje unutarnju energiju i rad:

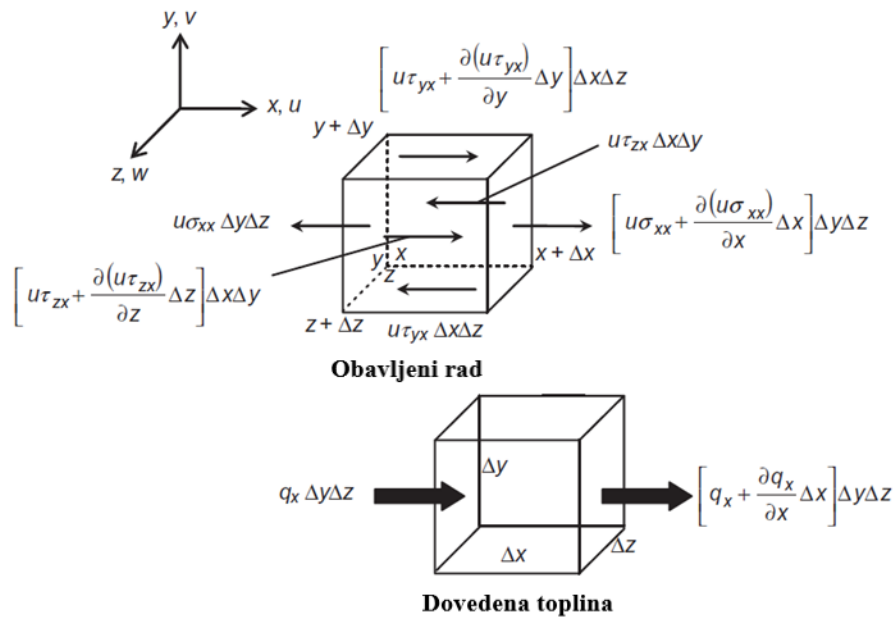
$$\Delta U = Q + W \quad (4-8)$$

Promjena unutarnje energije, ΔU može se, za fluidni element, izraziti kao:

$$\rho \frac{DE}{Dt} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (4-9)$$

Kako obavljeni rad ovisi o silama koje djeluju na volumen, jednačba očuvanja energije u nekonzervativnom obliku glasi:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial(u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(w\sigma_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} - \frac{\partial q_x}{\partial y} - \frac{\partial q_y}{\partial x} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (4-10)$$



Sl. 4.3. Obavljeni rad na fluid površinskim silama i toplina dana fluidu unutar infinitezimalnog kontrolnog volumena [30]

Prebacivanjem jednačbi u 2D osnosimetrični, cilindrični sustav sa uvedenim turbulencijama fluida, dobije se sljedeći izraz:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v T)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\beta T}{c_p} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v) - \rho \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v) \right] \quad (4-11)$$

Ovaj izraz koristi se standardnim κ - ϵ modelom za utvrđivanje turbulentnog toka fluida. Kako bi se prethodni izraz mogao koristiti, mora se odrediti vrtložna viskoznost μ_t :

$$\mu_t = \rho C_\mu C_D \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (4-12)$$

Rješavanje standardnog κ - ε modela nije moguće bez transportnih jednažbi:

- Konzervacija turbulentne kinetičke energije

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\kappa)}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v\kappa)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial r} \right) + P_k + G_k - \rho C_d \varepsilon \quad (4-13)$$

- Disipacija turbulentne kinetičke energije:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varepsilon)}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v\varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) \\ &+ \frac{C_1 \varepsilon}{\kappa} (P_k + G_k) (1 + 0,8R_f) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \end{aligned} \quad (4-14)$$

P_k predstavlja izraz izvora turbulentne kinetičke energije:

$$P_k = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] \quad (4-15)$$

G_k predstavlja turbulentnu kinetičku energiju uzrokovanu silom uzgona:

$$G_k = - \frac{\beta g}{\rho} \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4-16)$$

Nakon jednažbi vezanih za fluide i njihovo ponašanje, potrebno je postaviti jednažbe vezane za rad dimnjaka, odnosno jednažbe koje uzimaju u obzir materijal korišten za gradnju, dimenzije dimnjaka, izolaciju i sl.

Učinkovitost cijeloga sustava dobiva se kao umnožak učinkovitosti pojedinih dijelova dimnjaka ([8]):

$$\eta = \eta_c \eta_{ch} \eta_t \eta_g, \quad (4-17)$$

Gdje su:

- η_c učinkovitost kolektora
- η_{ch} učinkovitost tornja
- η_t učinkovitost turbine
- η_g učinkovitost generatora

Učinkovitost kolektora ovisi o primljenoj i predanoj toplinskoj energiji:

$$\eta_c = \frac{Q}{Q_s} = \frac{Q}{A_c G} = \frac{\rho_c A_{ch} v_{ch} c_p \Delta T}{A_c G}, \quad (4-18)$$

Gdje su:

- Q – predana toplinska energija
- Q_s – primljena toplinska energija
- A_c – površina kolektora
- G – intenzitet solarnog zračenja
- ρ_c – gustoća zraka
- A_{ch} – površina poprečnog presjeka tornja
- v_{ch} – brzina strujanja zraka u tornju
- c_p – specifični toplinski kapacitet zraka
- ΔT – razlika temperature između ulaza i izlaza kolektora

Toplina koju je primio zrak u kolektoru, Q , ovisi o masenom protoku \dot{m} , a može se zapisati kao:

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (4-19)$$

$$\dot{m} = \rho_c A_{ch} v_{ch} \quad (4-20)$$

Brzina strujanja zraka može se dobiti Boussinesq-ovom pretpostavkom za slobodno konvekcijsko strujanje:

$$v_{ch,max} = \sqrt{2gH \frac{\Delta T}{T_0}}, \quad (4-21)$$

Gdje je:

- H – visina tornja
- T_0 – temperatura okoline

Učinkovitost tornja ovisi o razlici tlaka u tornju kao i o njegovoj visini:

$$\eta_{ch} = \frac{\frac{1}{2} m v_{c,max}^2}{\dot{m} c_p \Delta T} = \frac{gH}{c_p T_0} \quad (4-22)$$

Učinkovitost turbine ovisi o padu tlaka zraka pri prolasku kroz turbinu:

$$\eta_t = \frac{\Delta p_t}{\Delta p_{tot}}, \quad (4-23)$$

Gdje je:

- p_t – pad tlaka u turbini
- p_{tot} – ukupni pad tlaka

Maksimalna mehanička snaga turbine:

$$P_{meh} = \frac{2}{3} \eta_c \eta_{ch} A_c G \quad (4-24)$$

Snaga generatora:

$$P_e = \frac{2}{3} \eta_c \eta_{ch} \eta_t \eta_g A_c G \quad (4-25)$$

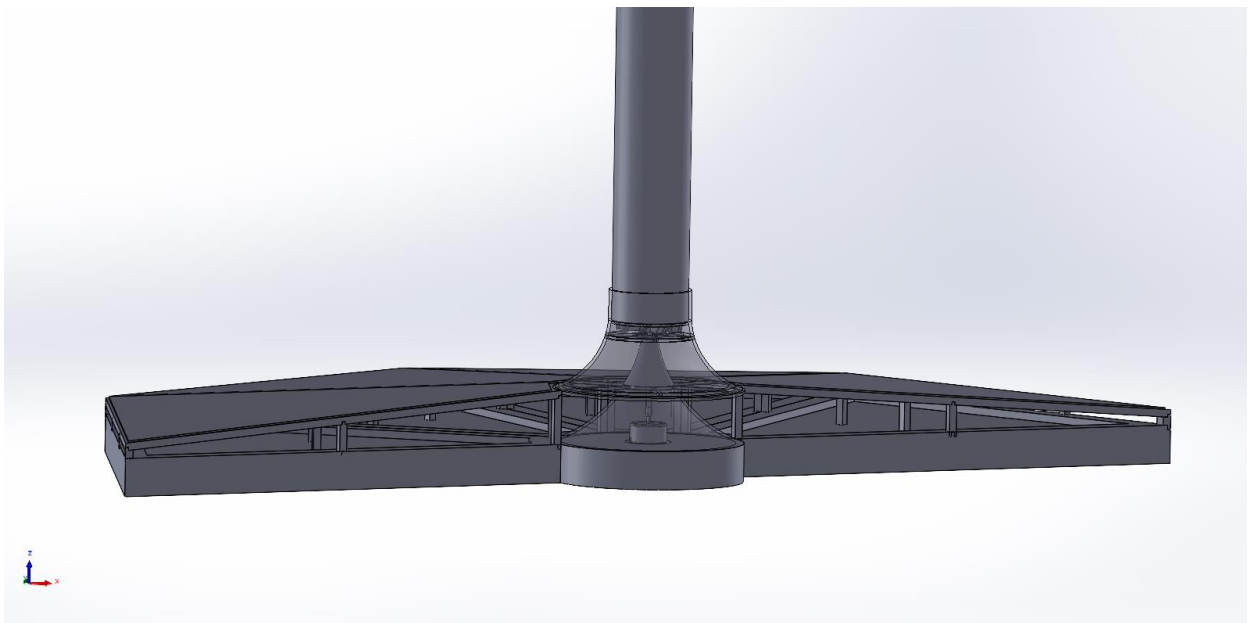
Optimalni omjer pada tlaka u turbini, $2/3$, uzet je prema [18] zbog konstantnog ozračenja, što uzrokuje konstantan tlak i razliku temperature, kao što je navedeno u poglavlju 3.3.

5. Izrada makete solarnog dimnjaka

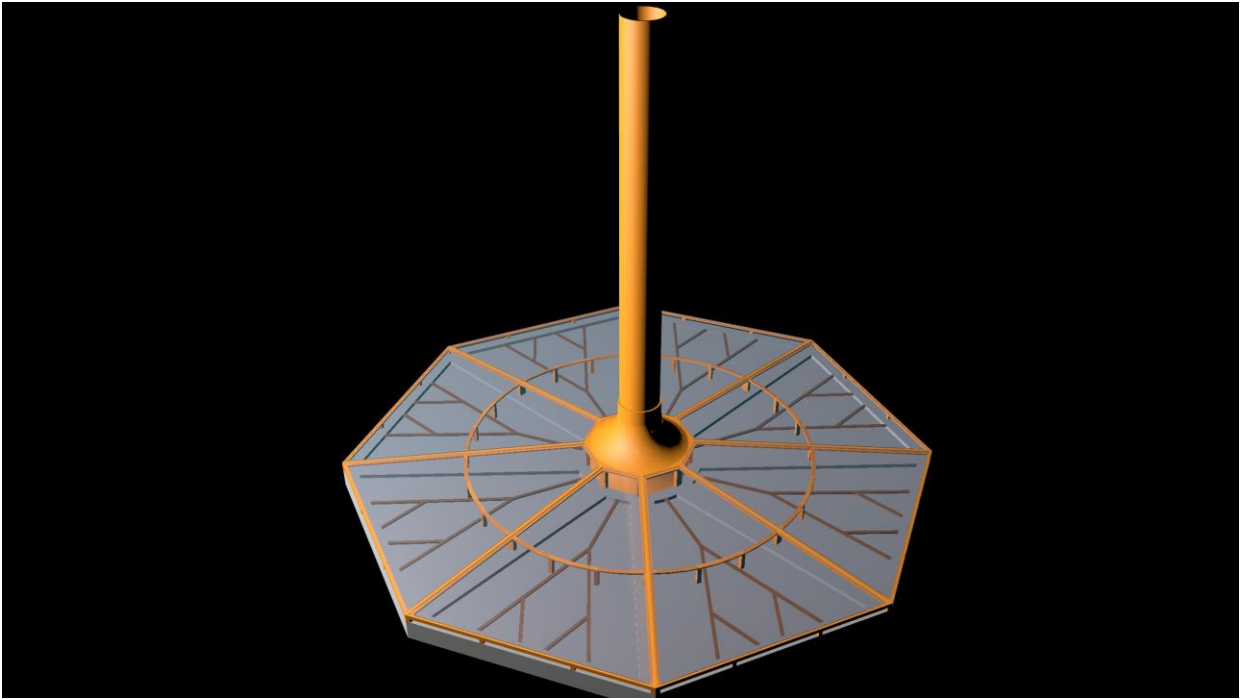
Izrada makete temelji se na spoznajama i rezultatima simulacija i mjerenja na fizičkim maketama pronađenim u znanstvenoj literaturi.

Za početak su napravljeni nacrti u AutoCAD-u, gdje su definirane dimenzije i realni raspored elemenata potrebnih za izradu makete (Prilozi 1 – 3). Dimenzije određenih dijelova makete, poput DC motora i ležajeva, bilo je potrebno izmjeriti, kako bi nacrt bio što točniji.

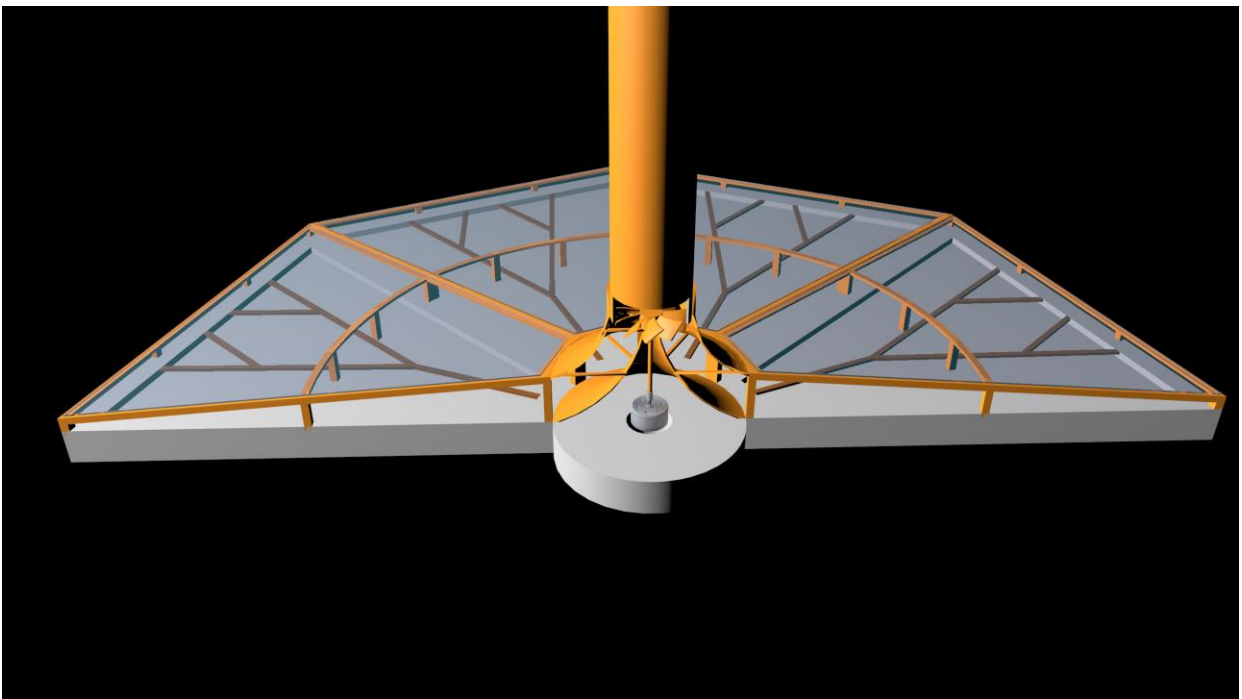
2D nacrti su zatim prebačeni u SOLIDWORKS, gdje se testiralo spajanje dijelova u jednu cjelinu kao i opći izgled makete. Napravljeni 3D modeli koristili su se za 3D ispis dijelova kao i za prosljeđivanje u Cinema 4D program, gdje su se dodale boje i efekti za realističan prikaz makete.



Sl. 5.1. SOLIDWORKS



Sl. 5.2. Cinema 4D

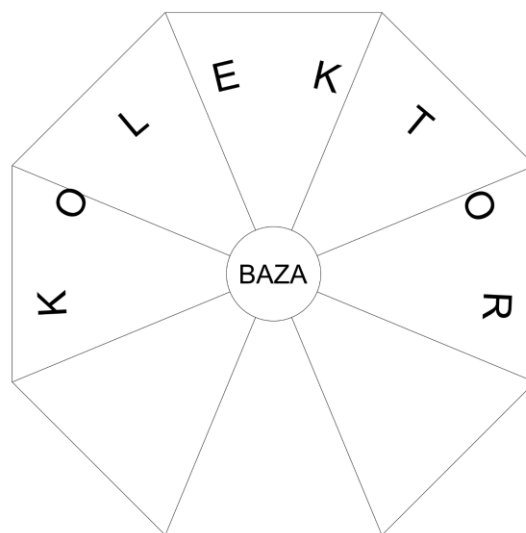


Sl. 5.3. Pogled u presjeku

Pomoću izrađenih nacрта i dijelova koji su napravljeni pomoću 3D ispisa, krenulo se u izradu makete. Prvi korak bio je odabir materijala i dijelova. Maketa je izrađena od četiri glavna dijela, a to su:

- Podloga
- Plastična konstrukcija
- Kolektorski dio
- Pogonski dio

Za podlogu je odabran ekstrudirani polistiren (XPS), debljine 2,5 cm. Podloga je izrezana na 9 dijelova, od kojih su 8 simetrični kolektorski dijelovi, a zadnji je kružno postolje tornja.



Sl. 5.4. Podloga makete

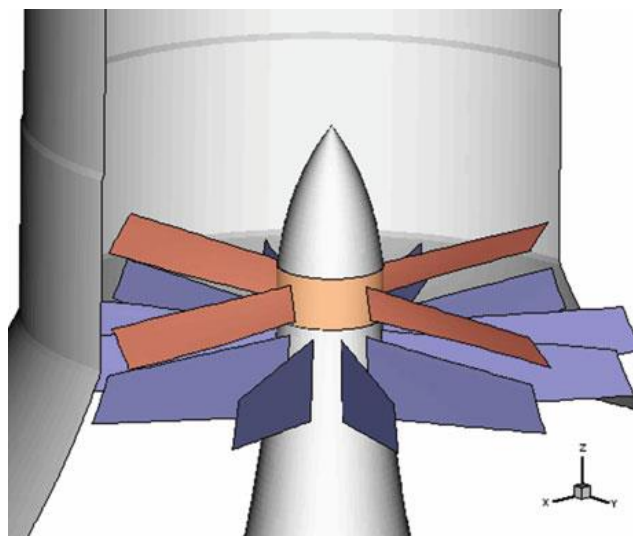
Na kolektorsku podlogu postavljena je 3D ispisana plastična konstrukcija koja podržava kolektorski pokrov, za koji je odabrano staklo (Prilozi 2 i 3). Na bazu tornja postavljeno je pero, koje služi za usmjerenje strujanja zraka kao i za potporu turbini i generatoru. Iznad pera je toranj napravljen od PVC cijevi. Između tornja i kolektorskog pokrova postoji prijelaz, koji služi kao potpora tornju.

Kolektor, osim primarne funkcije zagrijavanja zraka, je napravljen kao minijaturni staklenik sa plastičnim biljem koje predstavlja stvarno bilje u stakleniku.

Pogonski dio makete sastoji se od vjetroturbine i DC generatora. Plastična konstrukcija korištena je kao potpora za ležaj koji služi za stabilizaciju vratila koje povezuje generator i turbinu.

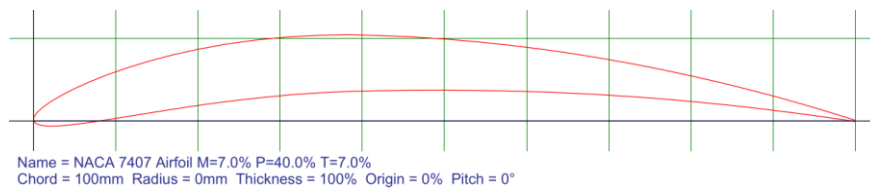
Više vrsta turbina je istraženo kako bi se odredio što optimalniji oblik koji bi se postigao zadovoljavajući moment odnosno broj okretaja, za pretpostavljene iznimno niske brzine strujanja zraka dimnjak. U obzir se uzeo profil lopatica za klasične, aksijalne vjetroturbine, oblik dobiven inverznom metodom, prema [30], te oblik lopatica prema ventilatoru za osobna računala.

Kako su profili lopatica za klasične vjetroturbine kao i oni dobiveni inverznom metodom, napravljeni sa uvidom da služe u većim sustavima, nisu prikladni za maketu ovih dimenzija, stoga je konačni profil odabran prema ventilatorima za osobna računala.



Sl. 5.5. Turbina dobivena inverznom metodom [30]

Odabran je aeroprofil NACA 7407, koji je prikladnog oblika. NACA aeroprofili (prema eng. *National Advisory Committee for Aeronautics*) označeni su sa više broja, koji određuju oblik profila. Za četveroznamenaste profile, poput odabranog, prva znamenka označava maksimalni nagib kao postotak dužine tetive. Druga znamenka označava udaljenost maksimalnog nagiba od prednjeg ruba aeroprofila u desetinkama tetive. Zadnje dvije znamenke označuju maksimalnu debljinu aeroprofila kao postotak tetive. Za generiranje ovoga aeroprofila koristio se specijaliziran online alat, dostupan na: <http://airfoiltools.com/>.



Sl. 5.6. Turbina i NACA 7407 aeroprofil

Zbog problema sa 3D ispisom ove turbine, oblik se morao pojednostaviti:



Sl. 5.7. Pojednostavljena turbina

Osim odabira profila, razmatrao se i broj lopatica turbine. Provela su se arbitrarna fizička istraživanja kako bi se odredio broj lopatica koji daje daje najbolje rezultate između 5, 7 i 9 lopatica. Budući da se radi o iznimno niskim brzinama strujanja vjetra kroz dimnjak, najbolje rezultate je pokazala turbina sa 9 lopatica. Razlog boljih performansi turbina sa više lopatica pri niskim brzinama je bolje iskorištenje energije vjetra jer lopatice zatvaraju veću površinu. Povećanjem brzine vjetra kinetička energija raste eksponencijalno, a zajedno s njom i turbulencije.

Turbina je pomoću 3D ispisanog vratila povezana sa DC motorom od 3 V, koji je u generatorskom načinu rada. Generator napaja LED, koja je štićena sa otpornikom. Sa pretpostavljenim naponom na diodi od 1 V, prema kirchoffovom zakonu možemo izračunati napon na otporniku:

$$\sum U = 0 V \quad (5-1)$$

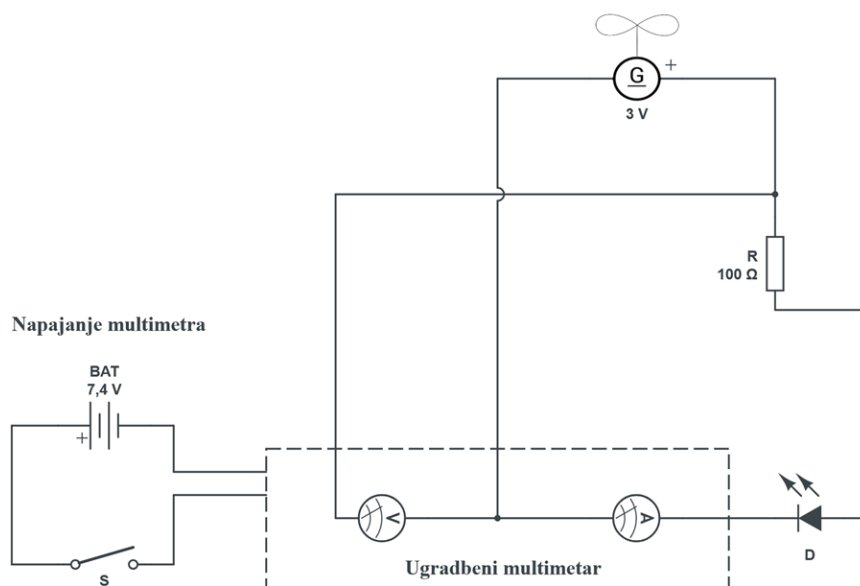
$$U_R = U_G - U_{LED} = 3 - 1 = 2 V$$

Sa ciljanom strujom od 20 mA pri maksimalnom naponu generatora, prema ohmovom zakonu možemo odrediti potreban otpor:

$$R = \frac{U}{I} \quad (5-2)$$

$$R = \frac{U_R}{I_{LED}} = \frac{2}{20 \cdot 10^{-3}} = 100 \Omega$$

Struju kroz krug, te napon na generatoru, mjeri ugradbeni multimetar sa zasebnim napajanjem.



Sl. 5.8. Električna shema

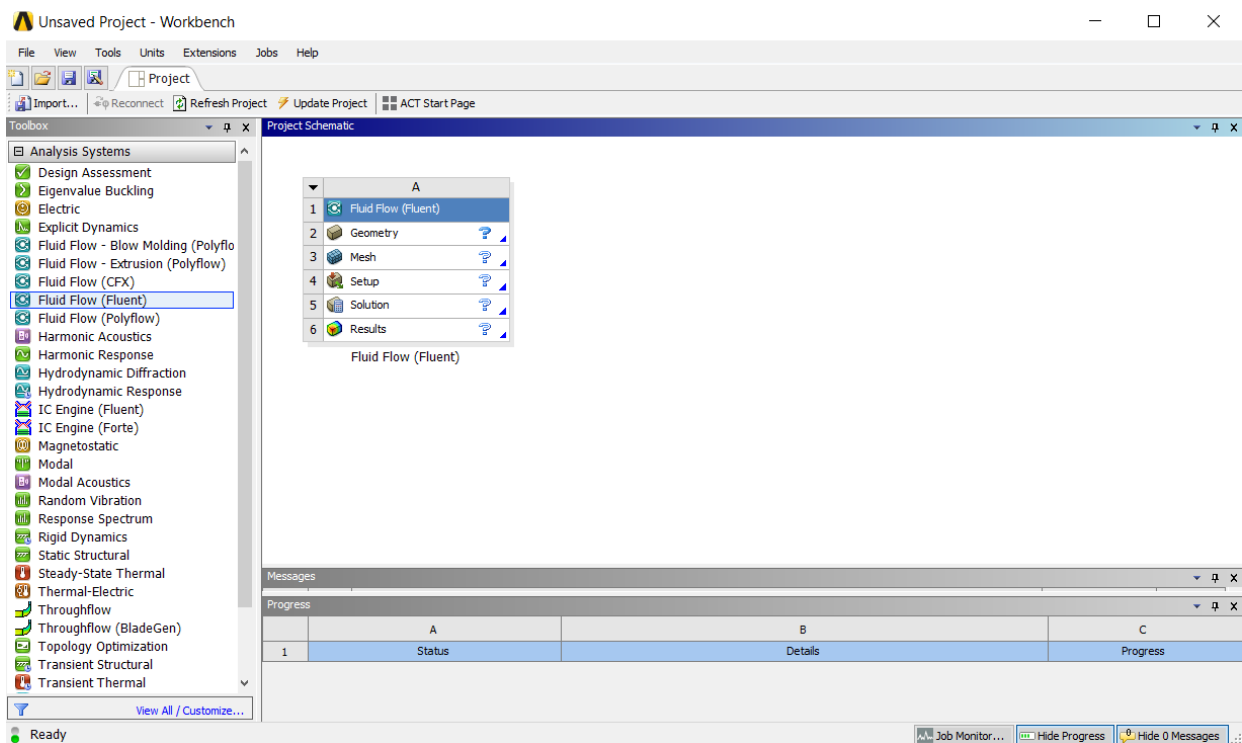
Za vrijeme pisanja ovoga rada pogonski dio nije realiziran, te nije moguće napraviti analizu izmjerenih veličina niti usporedbu sa očekivanim vrijednostima; međutim očekivane rezultate može se dobiti pomoću simulacije za ovu maketu, koja je obavljena u sljedećem poglavlju.

6. Simulacija termodinamičkog ponašanja matematičkog modela u ANSYS okruženju

Provedba simulacije provodi se u ANSYS Fluent 19.0 programu. Ovo je CFD program koji omogućuje simulaciju kompleksnog toka fluida odnosno daje rezultate za gibanja koja nije moguće analitički riješiti.

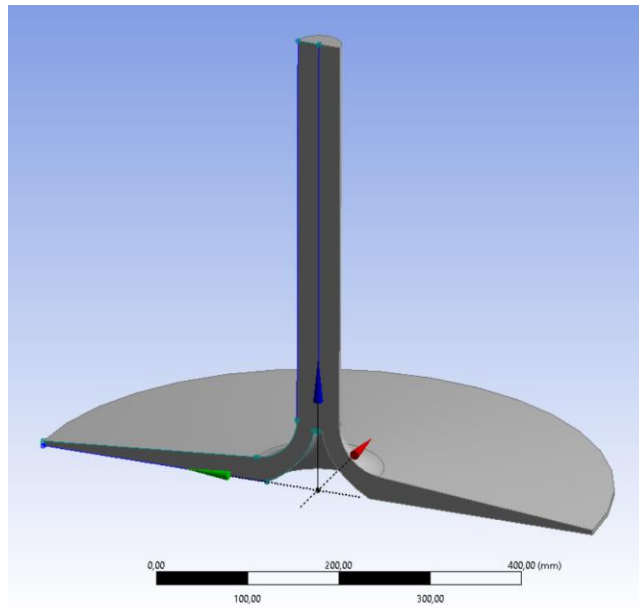
Pokretanjem ANSYS Workbench-a ponuđeni su razni programi za analiziranje sustava. Odabirom *Fluid Flow* (protok fluida), otvara se izbornik sa 5 koraka potrebnih za ostvarenje simulacije:

1. Geometrija
2. Mreža
3. Postavke
4. Rješenje
5. Rezultati



Sl. 6.1. ANSYS Fluent početni izbornik

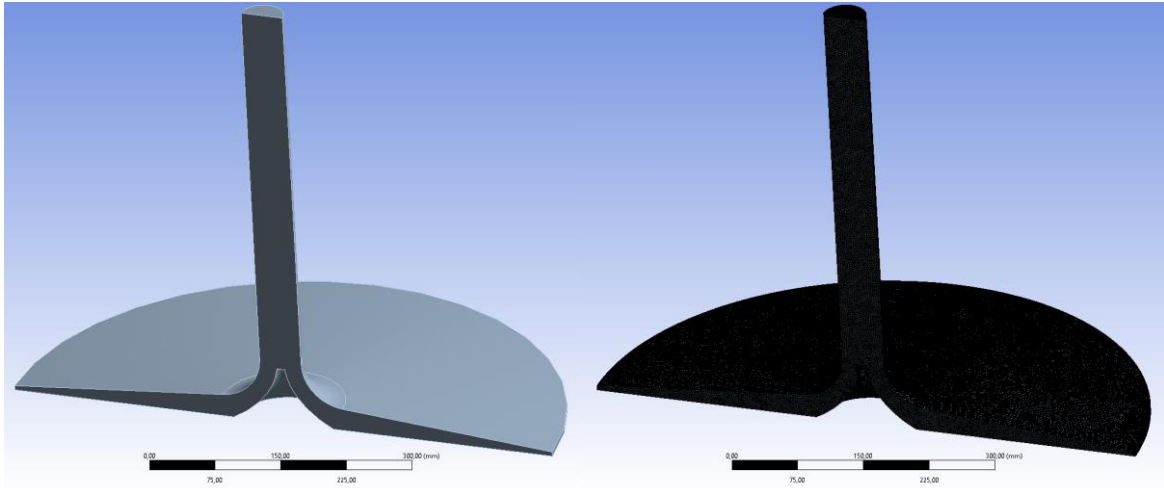
Odabirom geometrije otvara se DesignModeler u kojemu se može konstruirati i modificirati geometrija tijela koje se koristi za simulaciju.



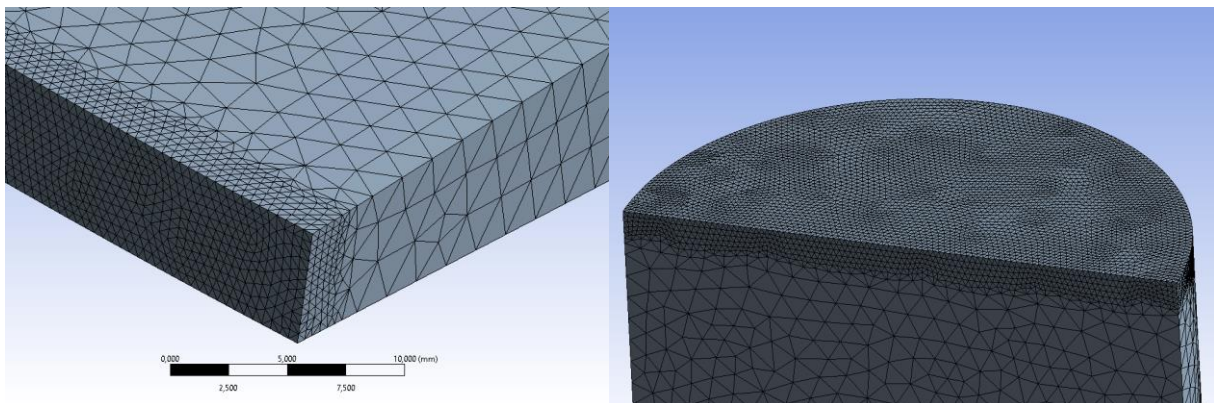
Sl. 6.2. ANSYS DesignModeler

Pomoću DesignModeler-a konstruirani su unutarnji bridovi solarnog dimnjaka, te se pomoću *revolve* opcije dobila 3D geometrija. Odabrano se 180° umjesto punoga kruga kako bi se skratilo vrijeme simulacije te dobio prikaz presjeka solarnog dimnjaka što pomaže pri interpretaciji rezultata. Polovični 3D model nema utjecaj na rezultate simulacije pomoću opcije za simetriranje zbog koje se presjek tretira kao da ne postoji, a na njegovom mjestu je spoj druge polovice dimnjaka. Kružni profil odabran je umjesto stvarne geometrije zbog jednostavnosti.

Nakon konstruiranja geometrije, prelazi se na generiranje mreže koja je nužna za provedbu simulacije. Otvaranjem mreže (eng. Mesh), dobijemo prikaz modela kao i opcije vezane za generiranje mreže. Opcije su odabrane tako da se dobije što finija mreža sa svrhom postizanja što točnijih rezultata simulacije odnosno dolaska do konvergencije. Mreža ulaza i izlaza se posebno refinirala jer njeni parametri najviše utječu na rezultate.



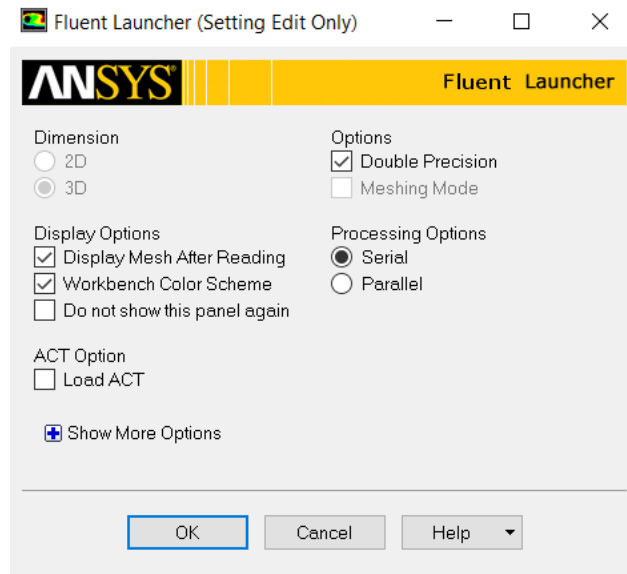
Sl. 6.3. Model prije i nakon generiranja mreže



Sl. 6.4. Mreža na ulazu kolektora i izlazu tornja

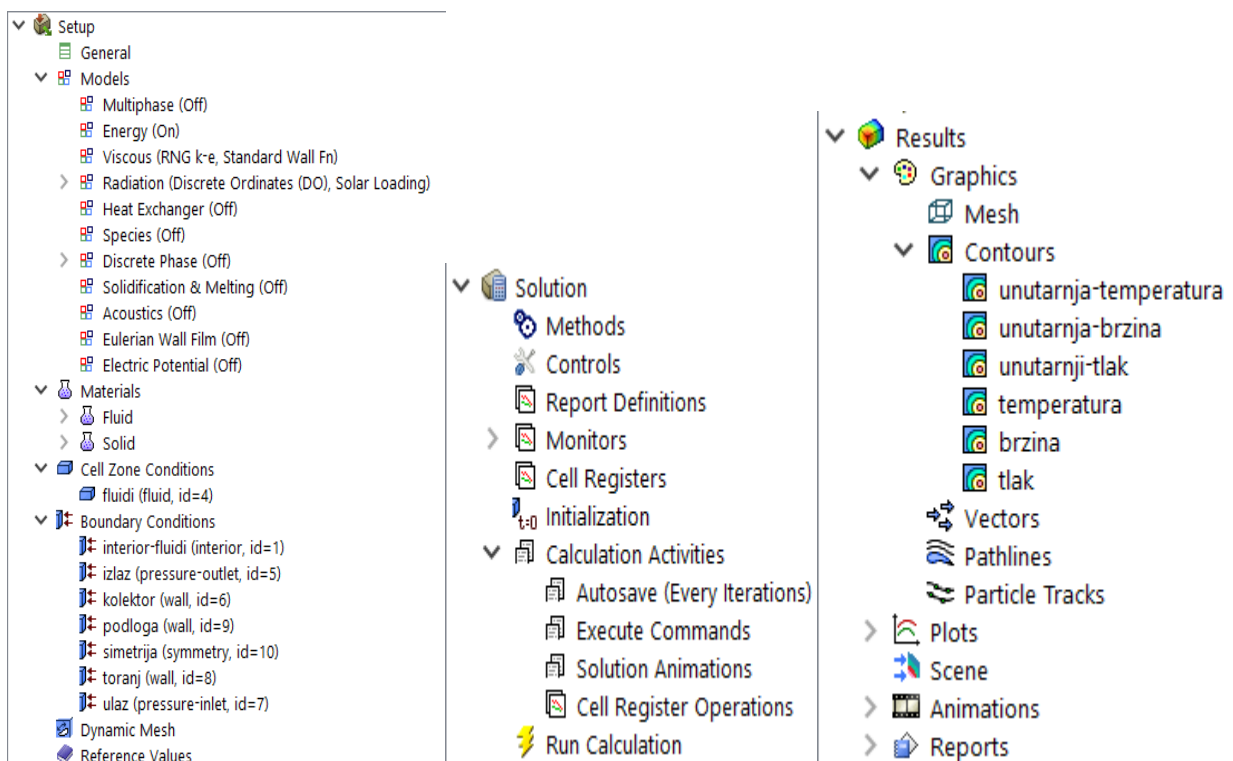
Generirana mreža sačinjena je od trokutastih elemenata. Unatoč jednostavnosti ove mreže, čime se postiže brže provođenje simulacije, ovaj oblik nije prikladan za rješavanje slojeva uz zidove modela u usporedbi sa kvadrilateralnim i heksahedralnim elementima. Kako bi se ublažili negativni utjecaji ovoga problema, smanjila se veličina elemenata odnosno povećao se broj elemenata mreže. [30]

Završetkom generiranja mreže, prelazi se na postavke (eng. Setup).



Sl. 6.5. ANSYS Fluent postavke

Simulaciju je moguće provesti u 2D sustavu budući da je konstrukcija dimnjaka osnosimetrična te je vrijeme potrebno za pronalaženje rješenja nadaleko manje od 3D sustava. Prednost 3D sustava je mogućnost vizualizacije odnosno bolje i lakše interpretacije rezultata. Zbog ovoga razloga odabran je 3D sustav. Pod opcijama odabrana je dvostruka preciznost zbog točnijeg rješenja.



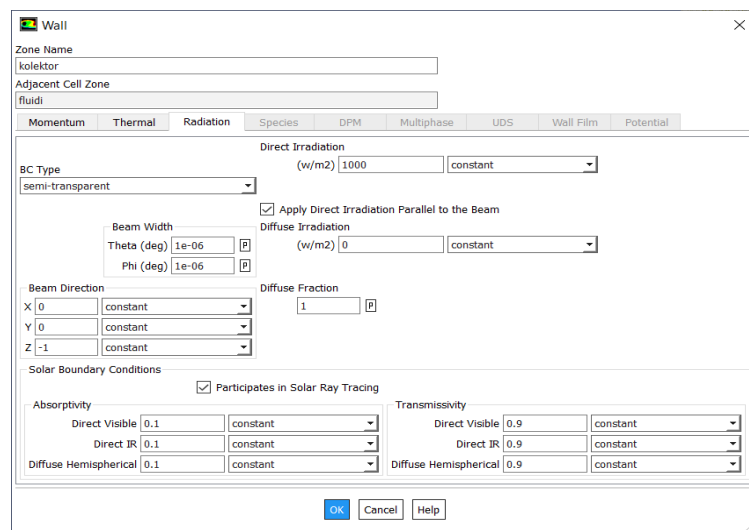
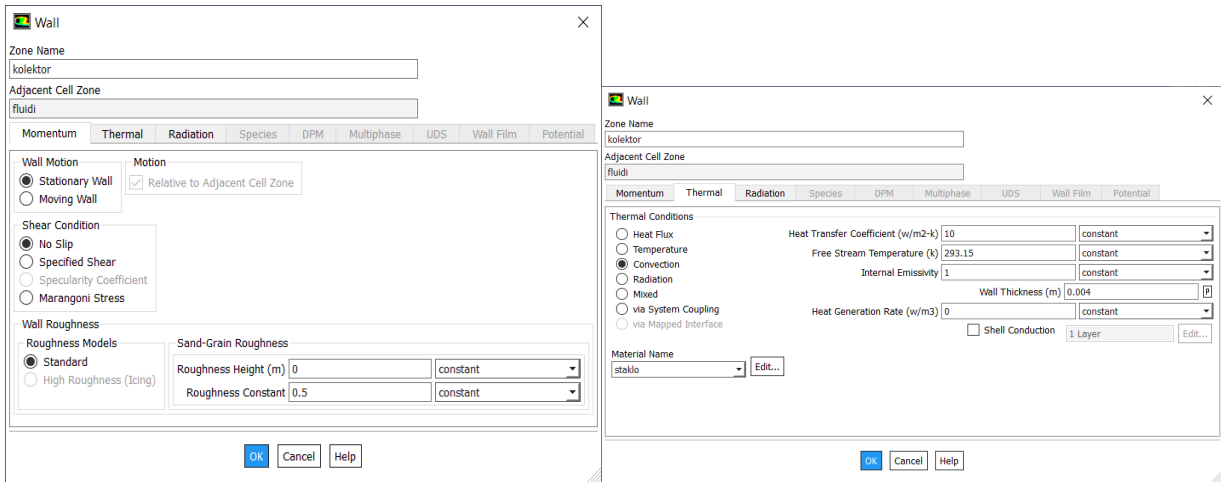
Sl. 6.6. ANSYS Fluent postavke, rješenje i rezultati

U ovome dijelu odabiru se matematički modeli koji su potrebni za provedbu simulacije. Odabire se jednadžba energije, k-ε RNG model za viskoznost fluida, te model radijacije „diskretne ordinate“ sa konstantnim sunčevim zračenjem od 1000 W/m² i usmjerenjem zračenja vertikalno na model. Nakon odabira matematičkih modela mogu se definirati materijali od kojih je solarni dimnjak izgrađen kao i fluidi koji se kreću modelom.

Tablica 6.1. Svojstva materijala i fluida

Naziv	Gustoća [kg/m ³]	Specifični toplinski kapacitet [J/(kg·K)]	Toplinska provodnost [W/(m·K)]	Viskoznost (Boussinesq) [kg/(m·s)]	Koeficijent absorpcije [1/m]	Koeficijent raspršenja [1/m]	Indeks refrakcije
Zrak	1,2046	1006,43	0,0242	1,7894·10 ⁻⁵	0,00331	0	1
XPS	35	1500	0,0286	/	0,9	0	1
Staklo	2500	750	1,15	/	0,03	0	1,516
PLA plastika	1220	1500	0,100	/	0,85	0	1

Dodavanjem materijala i definiranjem njihovih svojstava oni se mogu pridružiti pripadnoj geometriji. Započinje se određivanjem uvjeta ćelija mreže, koji su postavljeni: tlak od 101325 Pa, ubrzanje sile teže od 9,81 m/s², te temperatura od 293,15 K. Zatim se konfiguriraju granice modela. Ovdje se definira tip granice, koji može biti simetrija, unutrašnjost, tlačni ulaz, izlaz i sl., te momentne, toplinske i radijacijske postavke.



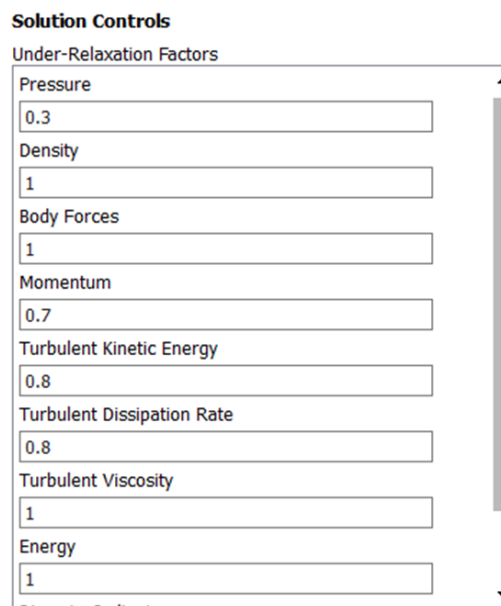
Sl. 6.7. Postavke za kolektorski pokrov

Postavke momenta obuhvaćaju gibanje zida odnosno da li je pomičan ili ne, djelovanje sile na zid, te hrapavost površine zida. Pomoću toplinskih postavki može se odabrati da li zid grije, ima određenu temperaturu ili prima toplinu. Budući da je kolektorski pokrov zid, odabire se konvekcija jer je grijani medij u kolektoru fluid. Također su se postavili koeficijent prolaza topline, temperatura slobodnog strujanja, te debljina zida. Postavke radijacije odnose se na interakciju između zida i toplinskog zračenja koje prima. Materijal zida odabran je kao polu-proziran budući da je pokrov kolektora ostakljen, te je zračenje postavljeno kao okomito na zid, iznosa 1000 W/m^2 .

Definiranjem svih granica modela, prelazi se *rješenje*. *Rješenje* se odnosi na sam postupak simulacije, te se odabire način na koji se simulacija odvija.

Odabrana je SIMPLE shema rješavanja, prema eng. *Semi-implicit method for pressure-linkage equations*. Ova shema koristi se pretpostavljenim poljem tlaka za rješavanje jednadžbi momenta. Koristi se jednadžba za korekciju tlaka, izvedena iz jednadžbe kontinuiteta, koja služi za dobivanje polja korekcije tlaka a ono se zatim koristi za ponovno računanje brzine i polja tlaka. Ovaj postupak se ponavlja kroz više iteracija, sve dok konvergencija nije postignuta. [30]

Jednadžbe za moment, turbulentnu disipaciju i dr. postavljene su kao jednadžbe drugog reda uz vjetar.



Sl. 6.8. Kontrola rješenja

Kontrola rješenja važan je korak za točne rezultate simulacije kao i broj iteracija potreban za konvergenciju. Promjenom faktora „pod-opuštanjem“ može se smanjiti broj iteracija potreban za postizanje konvergencije te spriječiti nepoželjno ponašanje simulacije. [30]

Zadnji korak prije početka simulacije je inicijalizacija. Ovdje program postavlja početne uvjete za simulaciju kroz određeni broj iteracija. Završetkom inicijalizacije može se započeti simulacija. Odabire se broj iteracija na kojem simulacija prestaje, ako se ne postigne konvergencija.

Rezultati simulacije ovisni su o mnogo odabranih opcija, poput načina na koji se simulacija odvija, broju iteracija, kvaliteti mreže i sl. U svrhu određivanja optimalnih rezultata, provela se simulacija za mreže od 640.000 i 3.000.000 elemenata, sa bilježenjem rezultata na 1000 i 3000 iteracija. Rezultati su prikazani u sljedećoj tablici:

Tablica 6.2. Uzorkovani rezultati simulacije

Mreža 1 Broj iteracija	Maksimalna brzina [m/s]	Maksimalna temperatura [K]	Temperatura na izlazu kolektora [K]	Maksimalni tlak [Pa]	Minimalni tlak [Pa]
1000	14	321	310	1,020	-0,9560
3000	0,00551	357	330	0,00001010	-6,470·10 ⁻⁶
Mreža 2 Broj iteracija					
1000	54,6	309	304	7,860	-1330
3000	1,67	346	322	0,00704	-0,7720

Prema tablici se može primijetiti kako se rezultati između istih iteracija, za različitu mrežu, znatno razlikuju. Kako bi provjerili koja mreža daje bolje rezultate, moraju se koristiti jednadžbe za analitičko rješavanje. Budući da ovaj problem nije moguće riješiti analitički, rezultati jednadžbi dati će okviran uvid da li su rezultati točni ili ne, umjesto davanja stvarnih vrijednosti. Pretpostavimo da je brzina stvarna vrijednost, te računamo ostale vrijednosti, koje zatim uspoređujemo sa vrijednostima iz simulacije. Konstante korištene za računanje dane su u tablici:

Tablica 6.3. Konstante

Naziv	Ubrzanje sile teže [m/s ²]	Temperatura okoliša [K]	Specifični toplinski kapacitet zraka [J/(kgK)]	Intenzitet sunčevog zračenja [W/m ²]
Iznos	9,81	293,15	29,07	1000
Naziv	Polumjer kolektora [m]	Poprečni presjek tornja [m ²]	Učinkovitost kolektora	Gustoća zraka [kg/m ³]
Iznos	0,375	0,008	0,03	1,14

Prema jednadžbi (4-20), računamo maseni protok:

$$\dot{m}_1 = \rho_c A_{ch} v_{ch} = 1,14 \cdot 0,008 \cdot 14 = 0,1277 \text{ kg/s}$$

Pomoću masenog protoka, možemo računati razliku temperature između ulaza i izlaza kolektora:

$$\Delta T = \eta_c \cdot \frac{G \cdot \pi \cdot r_C^2}{c_p \cdot \dot{m}} \quad (4-24)$$

$$\Delta T_1 = \eta_c \cdot \frac{G \cdot \pi \cdot r_C^2}{c_p \cdot \dot{m}_1} = 0,03 \cdot \frac{1000\pi \cdot 0,375^2}{29,07 \cdot 0,1277} = 3,57 \text{ K}$$

Za kraj računamo razliku tlaka prema:

$$\Delta p = \rho_c g H_{ch} \frac{\Delta T}{T_0} \quad (4-24)$$

Ova jednadžba vrijedi za solarni dimnjak bez turbine, prema kojem je simulacija rađena.

$$\Delta p_1 = \rho_c g H_{ch} \frac{\Delta T_1}{T_0} = 1,14 \cdot 9,81 \cdot 0,5 \cdot \frac{3,57}{293,15} = 0,068 \text{ Pa}$$

Izračune ponavljamo za sve ostale slučajeve, te ih uspoređujemo:

Tablica 6.4. Usporedba rezultata

Mreža 1		Simulacija		Računano	
Broj iteracija	Razlika temperature [K]	Razlika tlaka [Pa]	Razlika temperature [K]	Razlika tlaka [Pa]	
1000	17	1,976	3,57	0,06800	
3000	37	$1,657 \cdot 10^{-5}$	9073,03	173,02	
Mreža 2		Simulacija		Računano	
Broj iteracija	Razlika temperature [K]	Razlika tlaka [Pa]	Razlika temperature [K]	Razlika tlaka [Pa]	
1000	11	1337,86	0,92	0,01700	
3000	29	0,7790	30,39	0,5795	

Pomoću ovih rezultata možemo odrediti odstupanje:

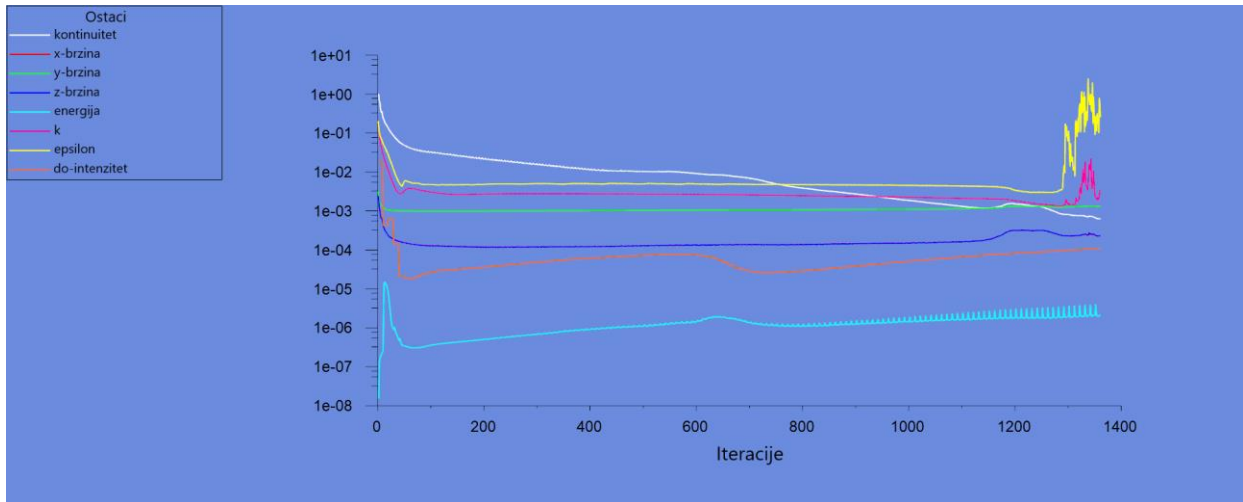
Tablica 6.5. Odstupanje rezultata

Mreža 1		Odstupanje	
Broj iteracija	Temperatura	Tlak	
1000	4,76	29,06	
3000	245,22	$10,44 \cdot 10^6$	
Mreža 2		Odstupanje	
Broj iteracija	Temperatura	Tlak	
1000	12,02	66932	
3000	1,05	1,34	

Odstupanje je računano kao koeficijent rezultata simulacije i računanih vrijednosti, sa brojnikom kao većom vrijednosti i nazivnikom kao manjom vrijednosti.

Prema tablici je vidljivo da mreža 2, koja ima više elemenata, ima rezultate koji su bliži stvarnoj vrijednosti. Potrebno je naglasiti da računani rezultati nisu stvarni, već samo daju uvid u rezultate simulacije i omogućuje usporedbu rezultata različitih simulacija bez potrebe za eksperimentalnim rezultatima.

Nakon što se odredila optimalna mreža za simulaciju, nastavilo se bilježenje rezultata kako bi se aproksimirao krajnji rezultat. Razlog bilježenja rezultata je nestabilnost simulacije nakon određenog broja iteracija. Ovaj problem nastaje zbog malih dimenzija modela te načina na koji program računa vrijednosti, što dovodi do fluktuacije rezultata i nemogućnosti dolaženja do konvergencije.



Sl. 6.9. Primjer neuspješne simulacije

Tablica 6.6. Konačni rezultati

Broj iteracija	Maksimalna brzina [m/s]	Maksimalna temperatura [K]	Temperatura na izlazu kolektora [K]	Maksimalni tlak [Pa]	Minimalni tlak [Pa]
1000	54,6	309	304	7,86	-1330
3000	1,67	346	322	0,00704	-0,7720
3500	0,662	354	325	$1,86 \cdot 10^{-3}$	-0,1110
4000	0,263	355	330	$0,835 \cdot 10^{-3}$	-0,01910
5000	0,0367	356	334	$99,2 \cdot 10^{-6}$	$-0,538 \cdot 10^{-3}$

Ponovno računamo razliku temperature i tlaka, uzimajući pri tome brzinu strujanja zraka kao stvarnu.

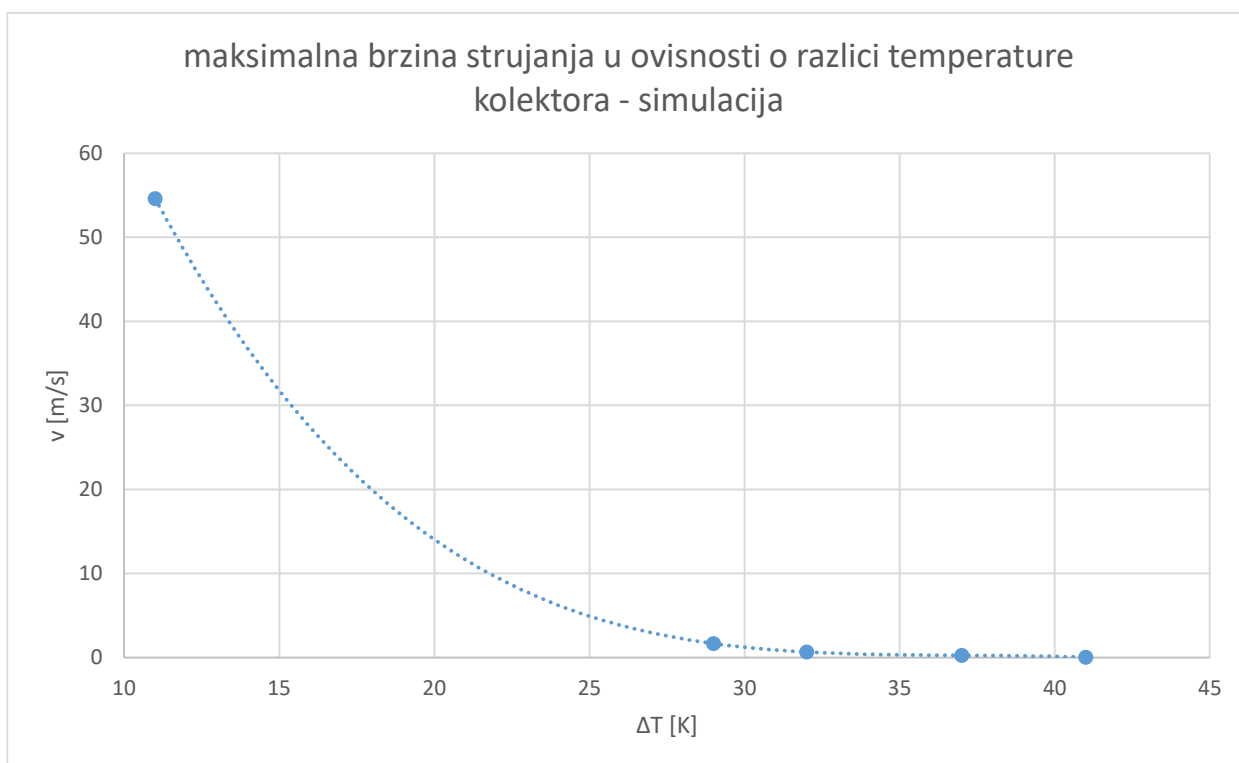
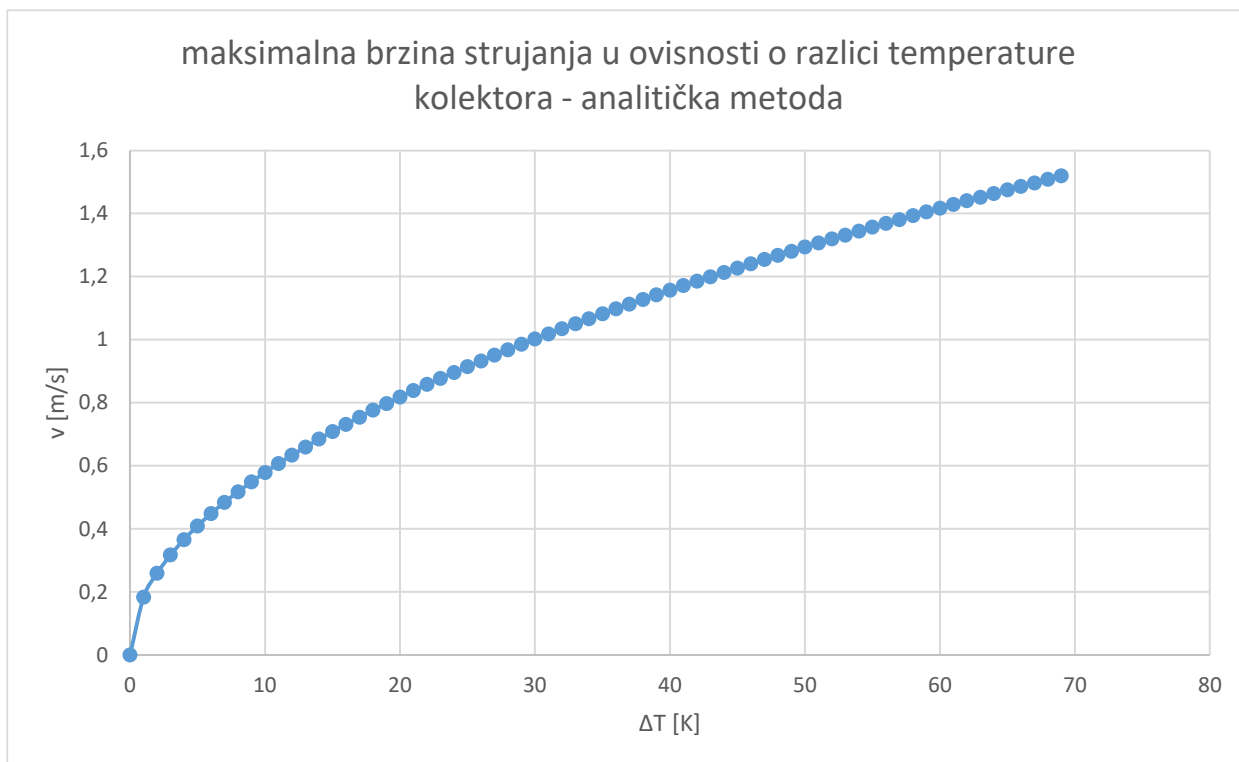
Tablica 6.7. Usporedba rezultata

Broj iteracija	Simulacija		Računano	
	Razlika temperature [K]	Razlika tlaka [Pa]	Razlika temperature [K]	Razlika tlaka [Pa]
1000	11	1137,86	0,92	0,01700
3000	29	0,7790	30,39	0,5795
3500	32	0,1129	75,52	1,440
4000	37	0,02000	189,97	3,620
5000	41	$6,372 \cdot 10^{-4}$	1362,18	25,98

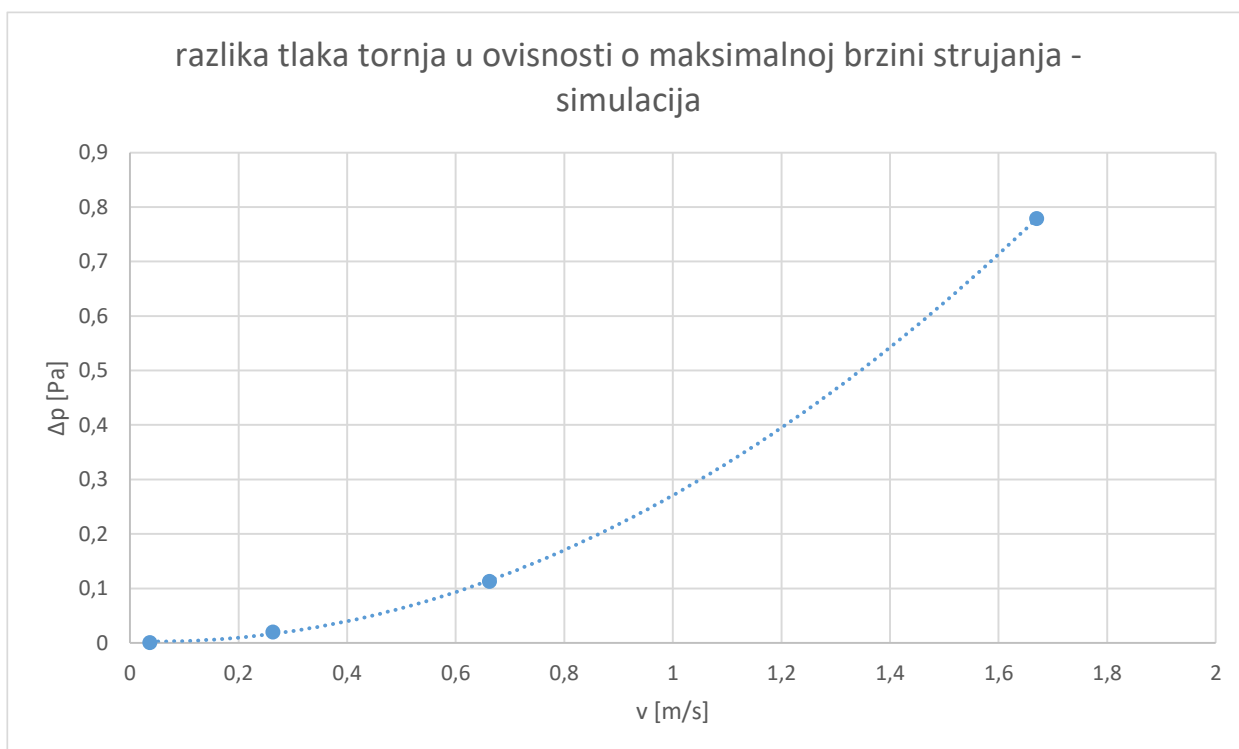
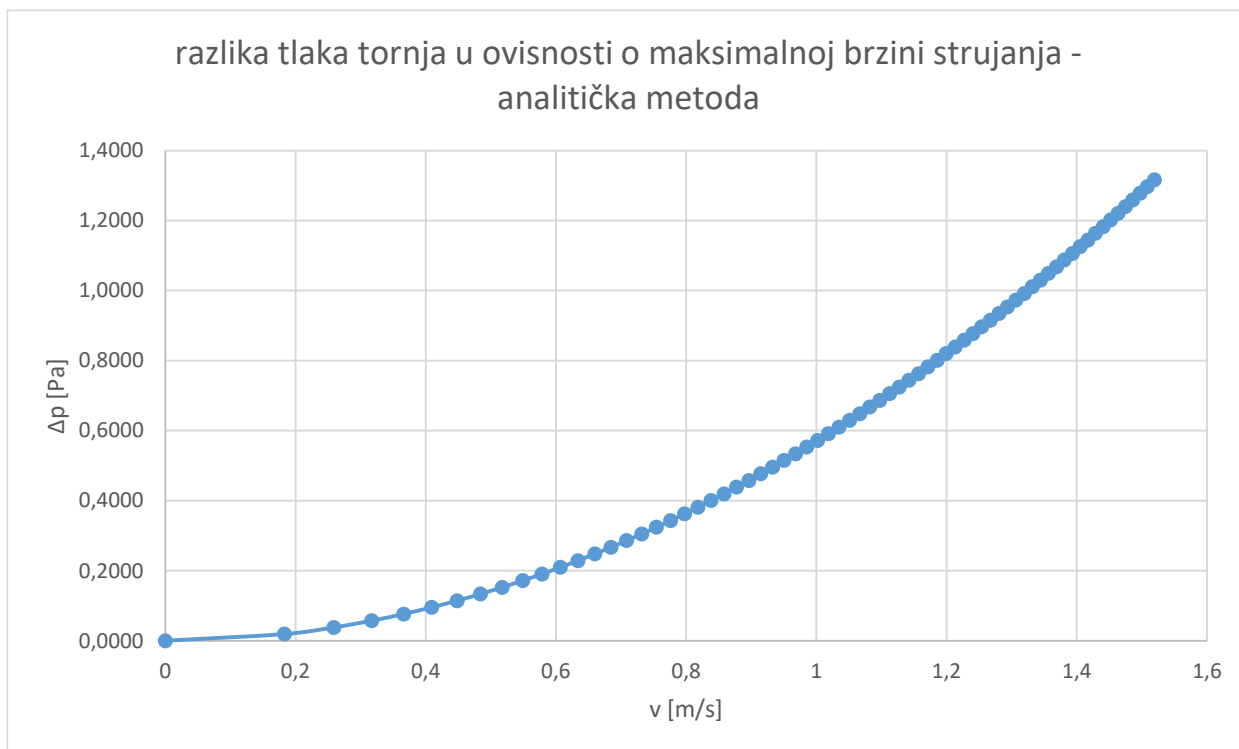
Tablica 6.8. Odstupanje rezultata

Broj iteracija	Odstupanje	
	Temperatura	Tlak
1000	12,02	66932
3000	1,05	1,34
3500	2,36	12,75
4000	5,13	181
5000	33,22	40772

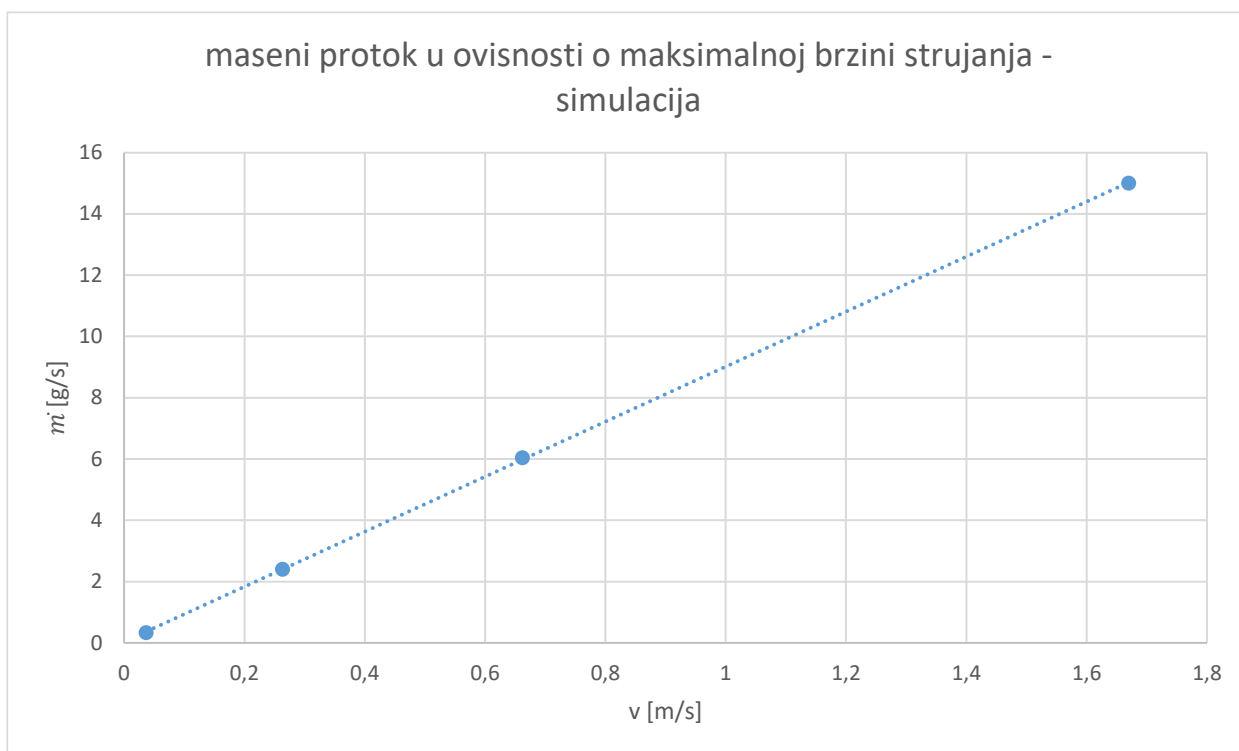
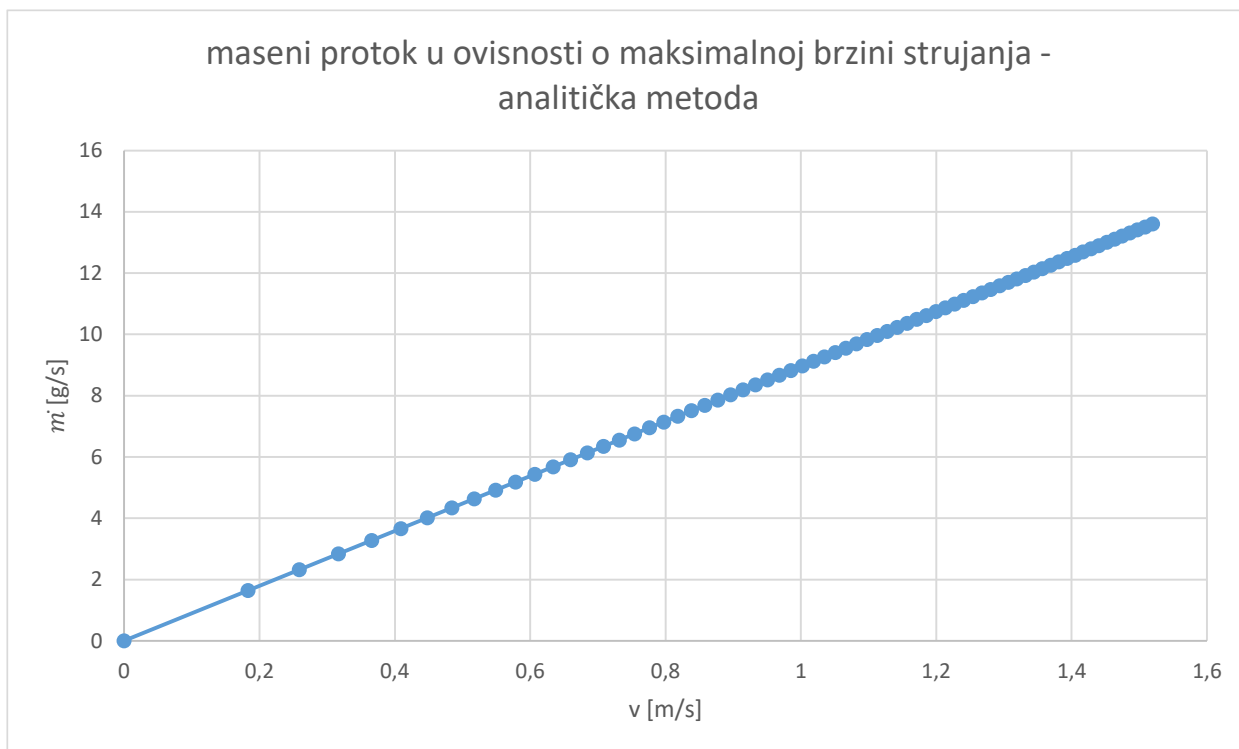
Prema tablici se može primijetiti da je najmanje odstupanje rezultata pri 3000 iteracija. Usporediti ćemo kretanje veličina simulacije i onih dobivenih analitičkim računanjem.



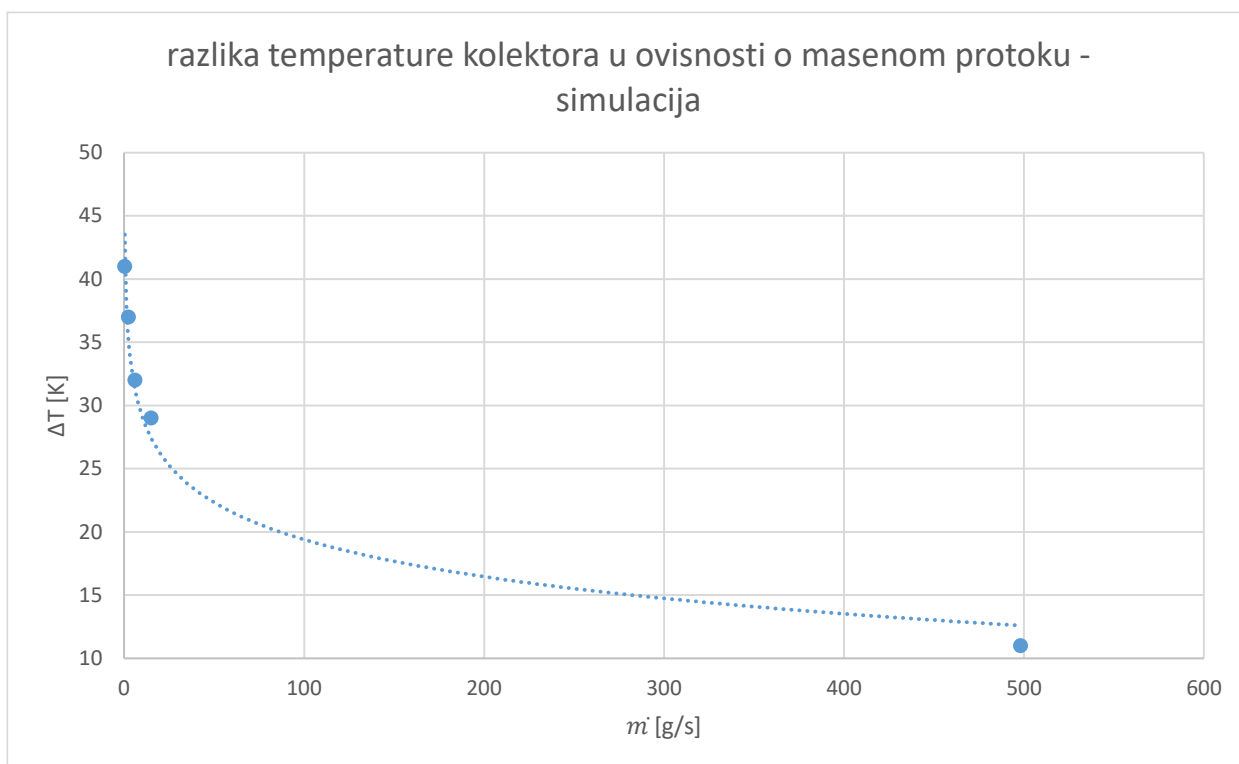
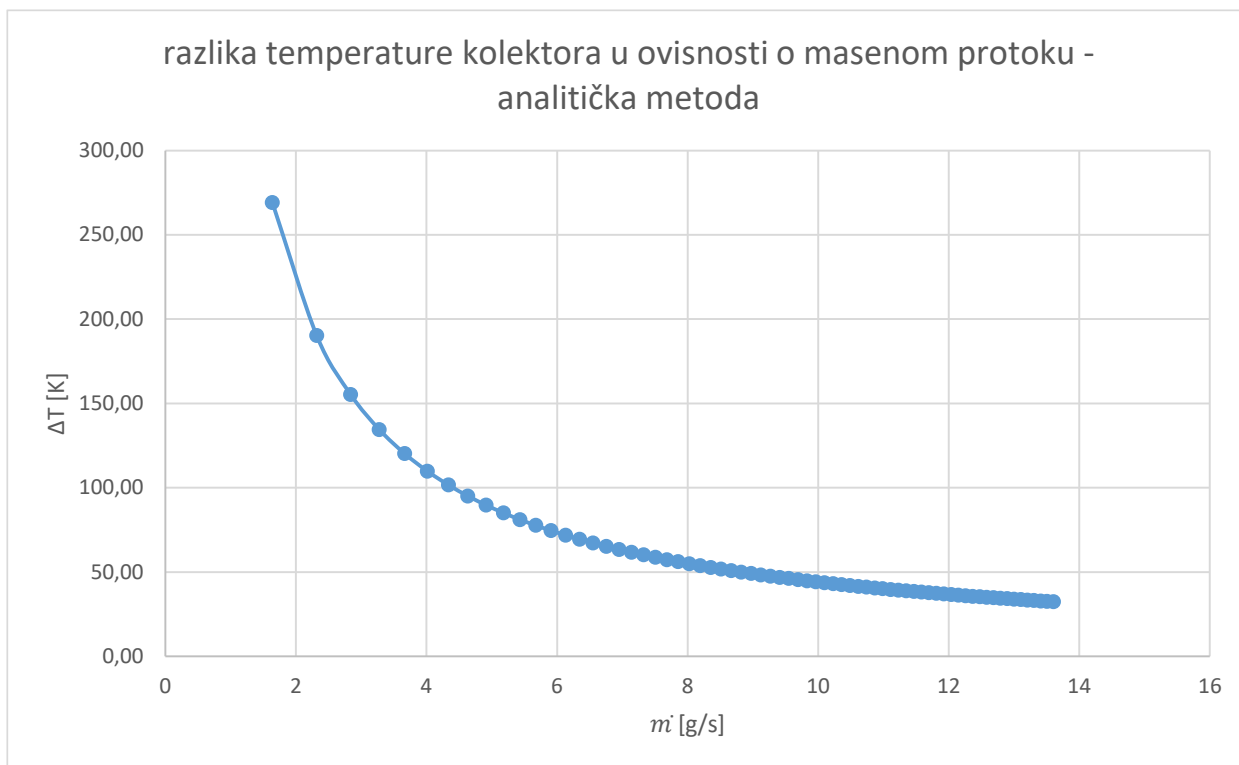
Sl. 6.10. Kretanje brzine strujanja zraka u ovisnosti o razlici temperature kolektora za analitičku metodu (gore) i simulaciju (dolje)



Sl. 6.11. Kretanje razlike tlaka u ovisnosti o maksimalnoj brzini strujanja zraka za analitičku metodu (gore) i simulaciju (dolje)



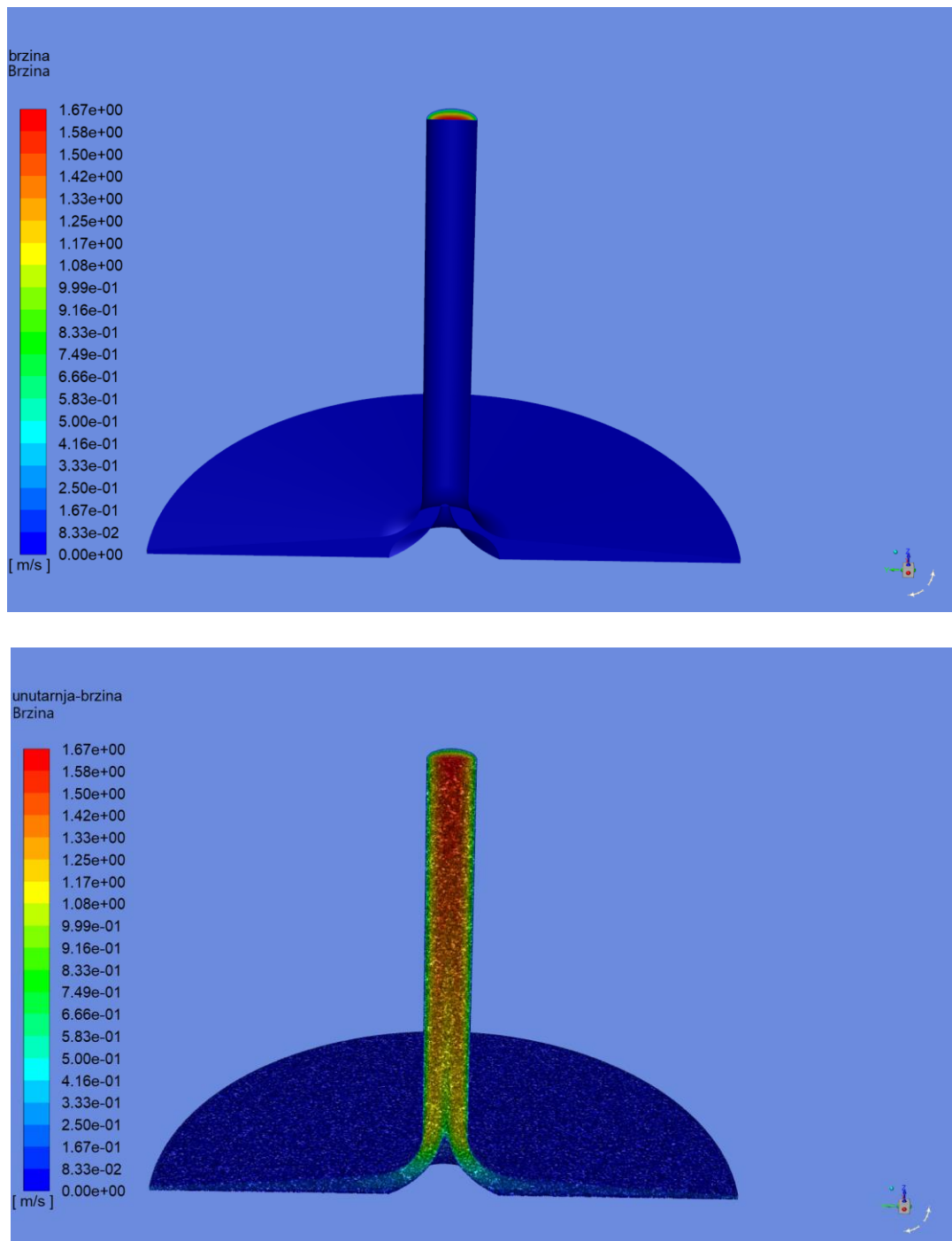
Sl. 6.12. Kretanje masenog protoka u ovisnosti o maksimalnoj brzini strujanja zraka za analitičku metodu (gore) i simulaciju (dolje)



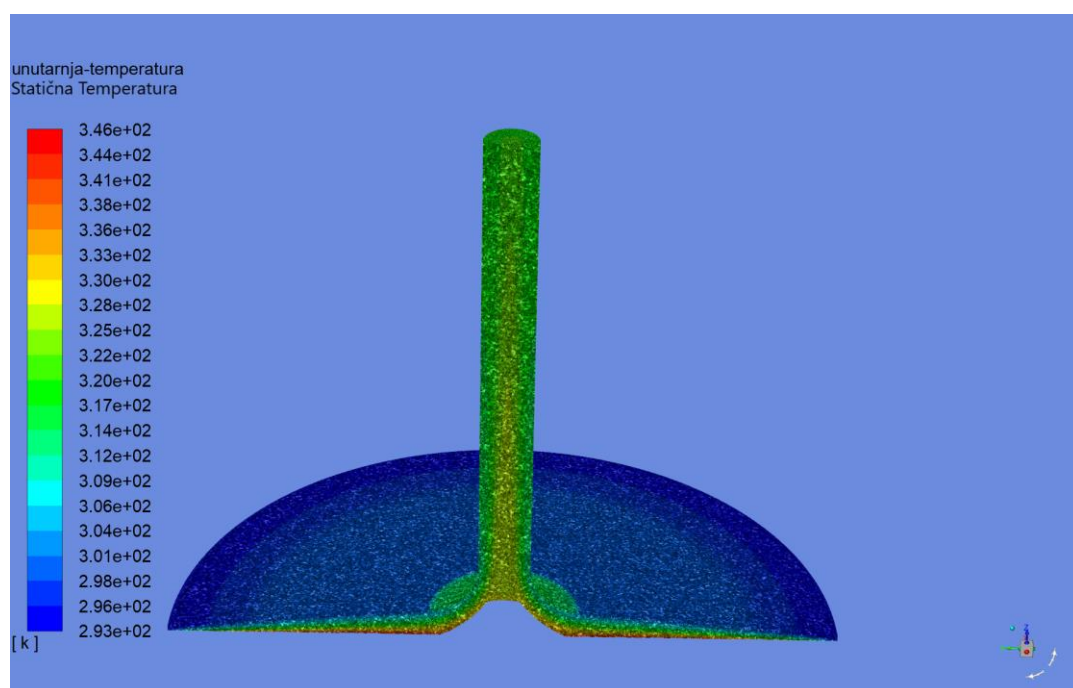
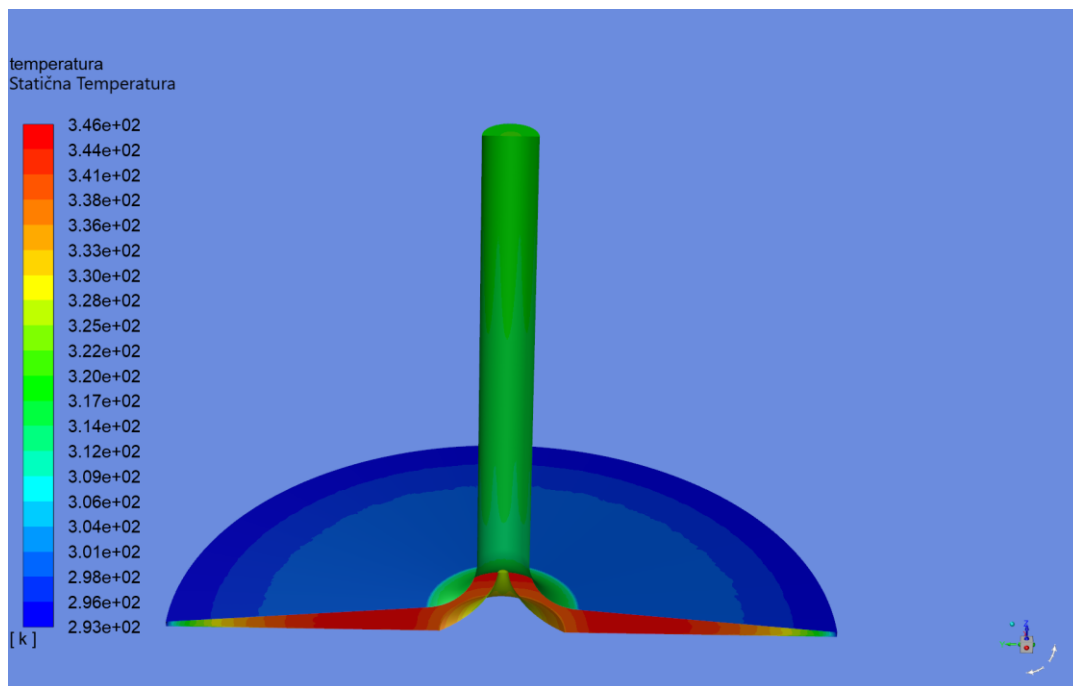
Sl. 6.13. Kretanje razlike temperature kolektora u ovisnosti o masenom protoku za analitičku metodu (gore) i simulaciju (dolje)

Usporedbom grafova vidljivo je da se ovisnost brzine strujanja o razlici temperature u kolektoru, za izračun, kreće obrnuto od simulacije dok se svi ostali grafovi poklapaju po krivulji trenda. Razlog ovome je način na koji program rješava simulaciju, te nema utjecaj na konačni rezultat.

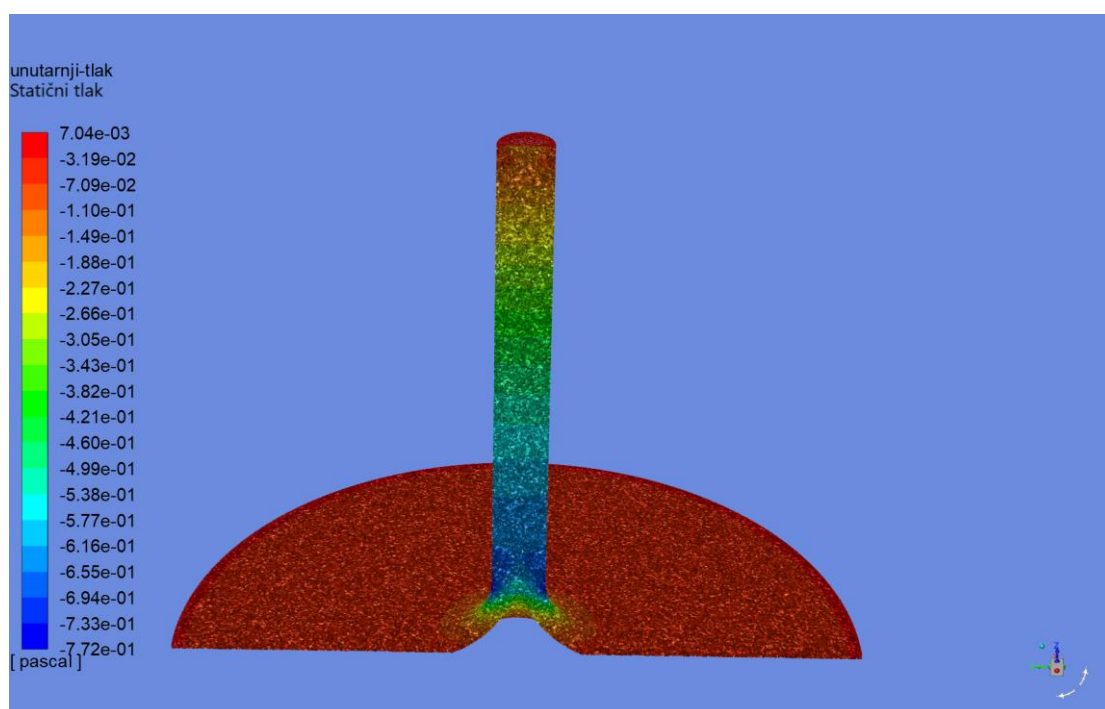
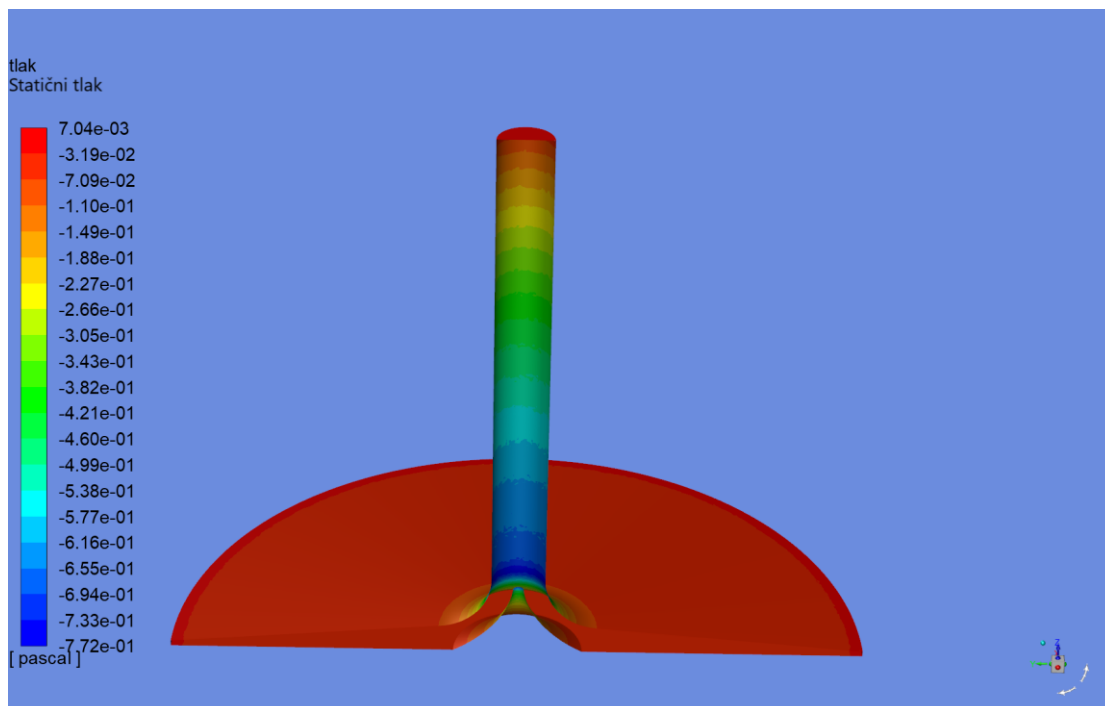
Prema ovim rezultatima, možemo zaključiti da su očekivane vrijednosti, koje bi bile izmjerene na fizičkoj maketi, približne vrijednostima simulacije pri 3000 iteracija.



Sl. 6.14. Grafički prikaz rasporedbe brzine strujanja pri zidovima (gore) i fluida unutar dimnjaka (dolje), za 3000 iteracija



Sl. 6.15. Grafički prikaz rasporedbe temperature pri zidovima (gore) i fluida unutar dimnjaka (dolje), za 3000 iteracija



Sl. 6.16. Grafički prikaz rasporedbe tlaka pri zidovima (gore) i fluida unutar dimnjaka (dolje), za 3000 iteracija

Pomoću ovih rezultata može se odrediti učinkovitost sustava i očekivanu proizvedenu električnu energiju.

Učinkovitost kolektora, prema (4-18):

$$\eta_c = \frac{\rho_c A_{ch} v_{ch} c_p \Delta T}{A_c G} = \frac{1,14 \cdot 0,008 \cdot 1,67 \cdot 29,07 \cdot 29}{(0,375^2 \cdot \pi) \cdot 1000} = 0,029$$

Učinkovitost tornja, prema (4-22):

$$\eta_{ch} = \frac{gH}{c_p T_0} = \frac{9,81 \cdot 0,5}{29,07 \cdot 293,15} = 0,5756 \cdot 10^{-3}$$

Sa pretpostavljenom učinkovitosti turbine od 50 % i generatora od 80 %, prema (4-17) može se izračunati ukupna učinkovitost sustava:

$$\eta = \eta_c \eta_{ch} \eta_t \eta_g = 0,029 \cdot (0,5756 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 6,677 \cdot 10^{-6}$$

Množenjem rezultata sa 100, dobije se učinkovitost u postocima:

$$\eta = (6,677 \cdot 10^{-6}) \cdot 100 = 0,6677 \cdot 10^{-3} \%$$

Razlog ove iznimno niske učinkovitosti leži u dimenzijama dimnjaka za koji se simulacija radila. Učinkovitost *SCPP*-ova raste sa njihovom veličinom, te i najveći dimnjaci imaju učinkovitost od otprilike 2 %. Prema izrazima 4-18 i 4-22, može se primjetiti kako učinkovitost kolektora ovisi o poprečnom presjeku tornja dok učinkovitost tornja ovisi o njegovoj visini.

Usljed niske učinkovitosti, može se očekivati i iznimno niska proizvedena električna energija. Prema (4-24) računa se mehanička snaga:

$$P_{meh} = \frac{2}{3} \eta_c \eta_{ch} A_c G = \frac{2}{3} \cdot 0,029 \cdot (0,5756 \cdot 10^{-3}) \cdot (0,375^2 \cdot \pi) \cdot 1000 = 4,92 \text{ mW}$$

Električna snaga dobije se množenjem mehaničke snage sa učinkovitosti turbine i generatora, prema (4-25):

$$P_e = P_{meh} \eta_t \eta_g = 4,92 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 1,968 \text{ mW}$$

7. Zaključak

Solarni dimnjak predstavlja unikatno rješenje za proizvodnju električne energije pomoću obnovljivih izvora energije. Mogućnost integracije drugih izvora energije, kao i mogućnosti iskorištenja difuznog sunčevog zračenja, neprestanog rada, te pretvaranja tla u obradivu površinu i proizvodnju pitke vode, čine ga iznimno fleksibilnom elektranom koja također može služiti i za proizvodnju hrane i vode.

Unatoč mnogim prednostima, glavni nedostatak ove elektrane je iznimno niska učinkovitost, a time i proizvodnja električne energije. Proizvodnja električne energije strogo je vezana za dimenzije solarnog dimnjaka, što rezultira zauzimanjem velike površine zemlje kao i više stotina metarskim dimnjacima, kod kojih se javlja problem gradnje. Velika površina također iziskuje velike troškove materijala što čini investicijsku cijenu vrlo visokom. Unatoč tome, cijena održavanja je zanemariva a materijali imaju dug životni vijek.

Pomoću znanstvene literature i simulacija, u ovom radu analizirao se rad solarnog dimnjaka, te njegove prednosti i mane. Znanstvena literatura dala je uvid u mogućnosti solarnih dimnjaka prema čemu se izradila maketa, na osnovu čijih se dimenzija napravila simulacija. Simulacija je dala uvid u očekivane rezultate na maketi pomoću kojih se odredila učinkovitost i proizvedena električna energija. Rezultati se poklapaju sa prethodno navedenim, a to su iznimno niska učinkovitost i proizvedena električna energija.

Prema ovim rezultatima, može se zaključiti da je tehnologija solarnih dimnjaka u trenutnom stanju nezadovoljavajuća te su potrebna unapređenja kako bi se opravdala gradnja ovih elektrana. Solarni dimnjaci imaju visok potencijal te je moguća njihova uporaba u ne-dalekoj budućnosti.

LITERATURA

- [1] J.Davenport, N.Wayth, „Statistical Review of World Energy: [online]“, Energy Institute, 2023, dostupno na: <https://www.energyinst.org/statistical-review> [19.6.2024.]
- [2] A.O.Dhahri, O.Ahmed, „A review of solar chimney power generation technology“, International Journal of Engineering and Advanced Technology, br. 2, sv. 3, veljača 2013.
- [3] W.Haaf, K.Friedrich, G.Mayr, J.Schlaich, „Solar Chimneys Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares“, International Journal of Solar Energy, br. 2, sv. 1, str. 3 – 20, travanj 2007.
- [4] A.S. hassan Abdallah, „Parametric investigation of solar chimney with new cooling tower integrated in a single room for New Assiut city, Egypt climate“, International Journal of Energy and Environmental Engineering, br. 92, sv. 5, travanj 2014.
- [5] T.Ming, „Solar Chimney Power Plant Generating Technology“, Elsevier Inc., Kina, 2016.
- [6] H.Nouar, T.Tahri, Y.Chiba, A.Azizi, „Thermal Investigation of a Solar Chimney Power Plant System: CFD Approach, Advances in Green Energies and Materials Technology, sv. 1, str. 367 – 374, Alžir, lipanj 2022.
- [7] J.M.Sun, M.Yang, Y.G.Shan, „The effect of the Inclined Angle on the Output in a Solar Chimney Power Plant System“, Challenges of Power Engineering and Environment: Proceedings of the International Conference on Power Engineering 2007, sv. 1, str. 1192 – 1195, Kina, 2007.
- [8] A.Jawad, M.S. bin Misran, A.S.Shaikat, Md. T.U.R.Erin, Md.M.Rahman, „Effects of Physical Geometry on Solar Chimney Performance“, Cold Inflow – Free Solar Chimney: Design and Applications, br. 1, sv. 1, str. 53 – 74, svibanj 2021.
- [9] W.Haaf, „Solar Chimneys Part 2 Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant“, International Journal of Solar Energy, br. 2, sv. 2, str. 141 – 161, veljača 2007.
- [10] H.Wang, J.Chen, P.Dai, F.Zhang, Q.Li, „Simulation and Experimental Study of the Influence of the Baffles on Solar Chimney Power Plant System“, Processes, br. 5, sv. 9, str. 902 – 921, svibanj 2021.
- [11] C.D.Papageorgiou, „Floating Solar Chimney vsrus Concrete Solar Chimney Power Plants“, 2007 International Conference on Clean Electrical Power, str. 760 – 765, 2007.
- [12] A.P.Singh, A.Kumar, Akshayveer, O.P Singh, „A novel concept of integrating bell-mouth inlet in converging-diverging solar chimney power plant“, Renewable Energy, sv. 169, str. 318 – 334, svibanj 2021.
- [13] M.A. dos S.Bernardes, „Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken“, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [14] H.Nasraoui ,M.Bsisa, Z.Driss, „Solar Chimney Power Plants: Numerical Investigations and Experimental Validation“, bentham Science Publishers Pte. Ltd, Singapur, 2020.
- [15] H.Nasraoui, Z.Driss, H.Kchaou „Effect of the chimney design on the thermal characteristics in solar chimney power plant“, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, sv. 140, str. 2721 – 2732, studeni 2019.
- [16] H.Semai, A.Bouhdjar, „Effect of slope tower angle and thermal storage media on flexibility solar chimney power plant performance“, Environmental Progress & Sustainable Energy, br. 5, sv. 40, travanj 2021.
- [17] T.W. von Backstrom, A.J.Gannon, „Solar chimney turbine characteristics“, Solar Energy, sv. 76, str. 235 – 241, siječanj 2004.
- [18] S. Nizetić, B. Klarin, „Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region“, Energy, br. 11, sv. 33, str. 1680 – 1690, 2008.
- [19] F.Cao, L.Zhao, H.Li, L.Guo, „Performance analysis of conventional and sloped solar chimney power plants in China“, Applied Thermal Engineering, sv. 50, str. 582 – 592, siječanj 2013.

- [20] H.Tabor, „Storage capability of solar ponds“, Thermal Storage of Solar Energy, str. 17 – 32, Nizozemska, 1980.
- [21] H.A. Abdul Wahhab, W.A.K. Al-Maliki, „Application of a Solar Chimney Power Plant to Electrical Generation in Covered Agricultural Fields“, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, sv. 671, Irak, 2019.
- [22] EnviroMission, dostupno na: <https://www.enviromission.com.au> [15.2.2024.]
- [23] F.Cao, L.Zhao, L.Guo, „Simulation of a sloped solar chimney power plant in Lanzhou“, Energy Conversion and Management, br. 6, sv. 52, str. 2360 – 2366, lipanj 2011.
- [24] C.Papageorgiou, „Floating solar chimney technology: a solar proposal for China“, Proceedings of ISES World Congress 2007, sv. 1 – 5, str. 172 – 176, 2008.
- [25] L.Zuo, L.Ding, J.Chen, X.Zhou, B.Xu, Z.Liu, „Comprehensive study od wind supercharged solar chimney power plant combined with seawater desalination“, Solar Energy, sv. 166, str. 59 – 70, svibanj 2018.
- [26] T.Ming, J.Gui, R.K. de Richter, Y.Pan, G.Xu, „Numerical analysis on the solar updraft power plant system with a blockage“, Solar Energy, sv. 98, dio A, str. 58 – 69, prosinac 2013.
- [27] J.-Y.Li, P.-H.Guo, Y.Wang, „Preliminary investigation of a novel solar and wind energy extraction system“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, br. 1, sv. 226, studeni 2011.
- [28] L.Zuo, Z.Liu, P.Dai, N.Qu, L.Ding, Y.Zheng, Y.Ge, „Economic performance evaluation of the wind supercharging solar chimney power plant combining desalination and waste heat after parameter optimization“, Energy, sv. 227, srpanj 2021.
- [29] M.R.Torabi, M.Hosseini, O.A.Akbari, H.H.Afrouzi, D.Toghraie, A.Kashani, A.Alizadeh, „Investigation the performance of solar chimney power plant for improving the efficiency and increasing the outlet power of turbines using computational fluid dynamics“, Energy Reports, sv. 7, str. 4555 – 4565, studeni 2021.
- [30] B.Negrou, S.Rahmouni, N.Settou, N.Chennouf, „Inverse Design Method of Wind Turbine in Solar Chimney Power Plants Coupled with Geothermal Energy“, Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability 1, str. 159 – 170, 2018.
- [31] Y.Tu, G.-H.Yeoh, C. Liu, „Computational Fluid Dynamics“, Butterworth-Heinemann, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2018.

SAŽETAK

Potreba za električnom energijom pokrenula je mnoga istraživanja za pronalazak rješenja ovoga problema. Jedan od koncepata koji je proizašao je solarni dimnjak. U ovome radu analizirale su se prednosti, mane te različite namjene i tehničke izvedbe solarnih dimnjaka kako bi se utvrdilo da li je njihovo korištenje ekonomski opravdano. Izrađena je maketa na kojoj se planiraju vršiti mjerenja kako bi se potvrdio matematički model, a na osnovu makete je provedena simulacija. Simulacija je dala uvid u očekivane rezultate koji bi bili izmjereni na maketi.

Ključne riječi: solarni dimnjak, obnovljivi izvori energije, solarna energija, vjetroturbina, ANSYS

ABSTRACT

The need for electrical energy has set in motion many research attempts in an effort to solve this problem. One of the emerging concepts is the solar chimney. In this thesis the pros, cons as well as a variety of purposes and technical solutions of solar chimneys were analysed for the purpose of finding out if their use is economically justified. A model was made, on which measurements are planned, in order to justify the mathematic model, and on the basis of the model a simulation was ran. The simulation gave an insight into the expected results which would have been measured on the model.

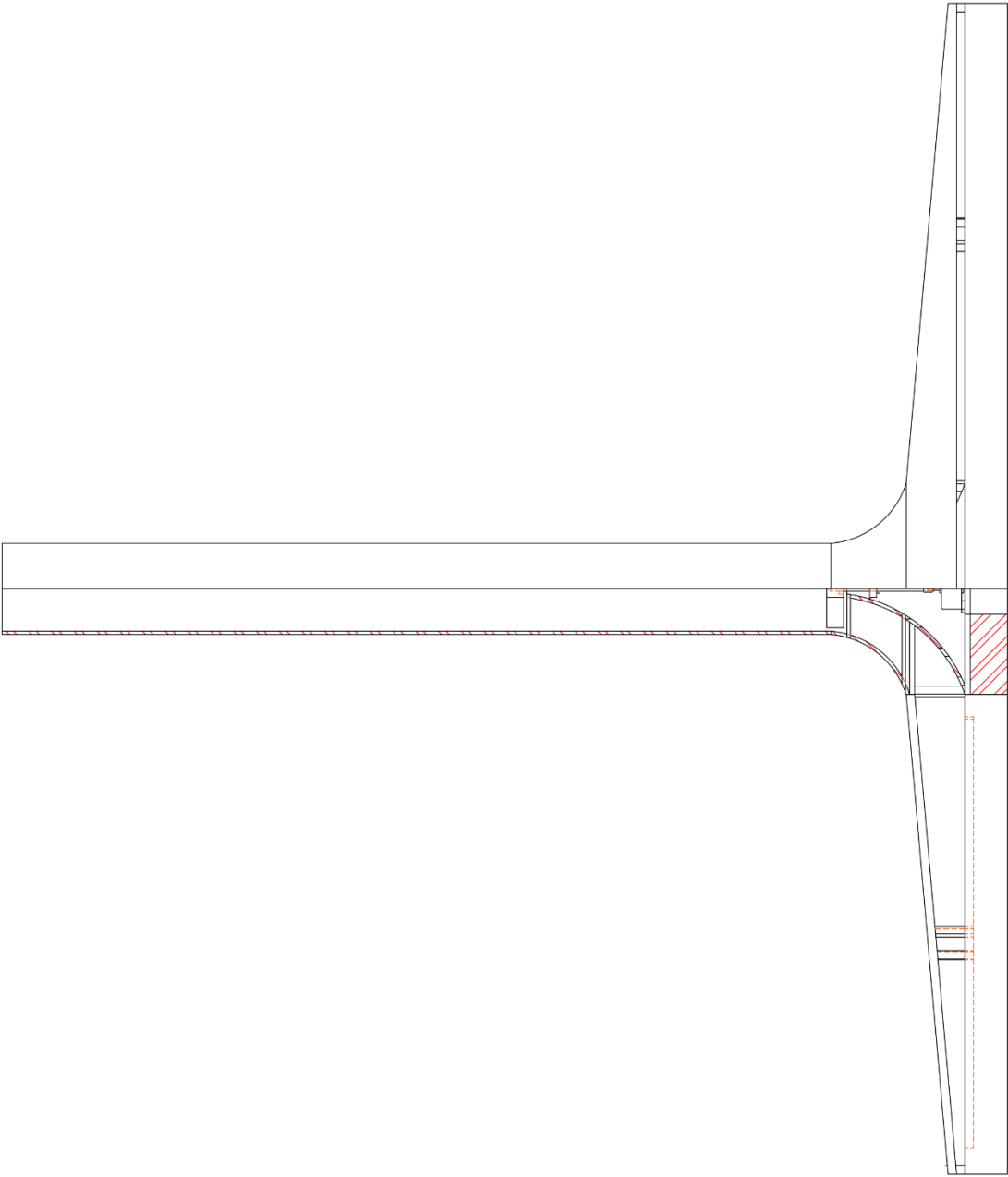
Key words: solar chimney, renewable energy sources, solar energy, wind turbine, ANSYS

ŽIVOTOPIS

Luka Šplajt, sin Snježane i Zorana, rođen je 23.8.2000. u Vinkovcima. U selu Rokovci, gdje trenutno živi, završava osnovnu školu Ivana Brlić-Mažuranić. Nakon završetka osnovne škole, godine 2015. upisuje se u srednju Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima, smjer mehatronika. Godine 2019., nakon završenog srednjoškolskog obrazovanja, upisuje se na preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike i informacijskih tehnologija na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku te ga uspješno završava. Trenutno pohađa sveučilišni diplomski studij elektrotehnike, podsmjera održive elektroenergetike, u nadi za uspješnim završetkom studiranja i pridonosu području elektrotehnike nakon diplomiranja.

Potpis autora

Prilog 1



Prilog 2

