Numerički model za dinamičku simulaciju rada solarnog spremnika tople vode

Beš, Borna

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:914651

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Borna Beš

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Numerički model za dinamičku simulaciju rada solarnog spremnika tople vode

Mentor:
Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:
Borna Beš

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvala
Tijekom same razrade zadatka nailazio sam na niz problema stoga bih se posebno zahvalio svom mentoru prof. dr. sc. Damiru Doviću na razumijevanju, podršci i korisnim savjetima. Zahvaljujem se i asistentu Ivanu Horvatu na pruženoj podršci i savjetima, te asistentu Alenu Cukrovu i kolegi Petru Filipoviću na savjetima u računalnom dijelu rada.
Osim toga, želio bi se zahvaliti svim prijateljima i rodbini, a posebno svojim roditeljima na pruženoj potpori te strpljenju koje su imali za mene tijekom svih ovih godina studiranja.

Borna Beš

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Borna Beš** Mat. br.: 0035186164

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerički model za dinamičku simulaciju rada solarnog spremnika tople vode**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Model for Dynamic Simulation of Solar Storage Tank**

Opis zadatka:

U sklopu diplomskog rada potrebno je razviti numerički model za dinamičku simulaciju rada akumulacijskog spremnika solarnog toplovodnog sustava za pripremu potrošne tople vode. Simulacije je potrebno provesti u računalnom programu ANSYS Fluent.

Model mora obuhvatiti periode sa i bez odvođenja potrošne tople vode iz spremnika. Analize provesti za zimski i ljetni režim rada solarnog sustava.

Zapreminu spremnika i nazivni toplinski učin izmjenjivača solarnog kruga i pomoćnog grijača prilagoditi odabranom solarnom sustavu i dnevnoj potrošnji potrošne tople vode.

Rezultate simulacija usporediti s rezultatima proračuna spremnika tople vode prema normi HRN EN 15316-5:2017, satna metoda, s podjelom spremnika na više volumnih dijelova.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: 15. studenog 2018.

Datum predaje rada: 17. siječnja 2019.

Predviđeni datum obrane: 23., 24. i 25. siječnja 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. ENERGIJA SUNCA 2
2.1. Sunčevo zračenje 3
3. SUNČANI TOPLOVODNI SUSTAVI ZA PRIPREMU PTV-A 5
4. ZAKONI DINAMIKE FLUIDA 7
4.1. Turbulentno strujanje 8
4.2. Određivanje turbulentne viskoznosti 9
4.3. Model strujanja u blizini stjenke 10
5. DISKRETIZACIJA OSNOVNIH JEDNADŽBI DINAMIKE FLUIDA 12
5.1. Algoritam rješavanja diskretiziranih jednadžbi 13
5.2. Interpolacijska shema tlaka 13
5.3. Korekcije tlaka i brzine 13
5.4. Courantov broj 14
6. ZAPREMNINA SPREMNIKA I TOPLINSKI UČIN IZMJENJIVAČA SOLARNOG KRUGA I POMOĆNOG GRIJAČA 15
6.1. Satna simulacija sustava 16
6.1.1. Upadno zračenje na kolektor 16
6.1.2. Satna potrošnja PTV-a 17
6.1.3. Efikasnost pločastog kolektora 18
6.1.4. Prikupljena energija na kolektoru 19
6.1.5. Energija odvedena iz spremnika 19
6.1.6. Akumulirana energija u spremniku 19
6.1.7. Prirast temperature u spremniku 20
6.1.8. Energija pomoćnog grijača 20
6.2. Rezultati satne simulacije 20
7. RAČUNALNA SIMULACIJA 23

7.1. Geometrija spremnika 23
7.2. Generiranje mreže 24
7.3. Rubni uvjeti 25
8. PRORAČUN SPREMNIKA PREMA NORMI HRN EN 15316 – 5:2017 26
9. REZULTATI SIMULACIJE 29
9.1. Ljetni režim rada spremnika 29
9.1.1. Inicijalizacija (t=0 min) 30
9.1.2. Period sa potrošnjom PTV-a (od t=0 min do t=8 min) 33
9.1.3. Period bez potrošnje PTV-a (od t=8 min do t= 60 min) 37
9.2. Zimski režim rada solarnog spremnika 41
9.2.1. Inicijalizacija (t = 0 min) 41
9.2.2. Period sa potrošnjom PTV-a (od t=0 min do t=8 min) 45
9.2.3. Period bez potrošnje PTV-a (od t=8 min do t= 60 min) 49
10. STUPANJ EFIKASNOSTI KOLEKTORA 54
11. ZAKLJUČAK 60

POPIS SLIKA

Slika 1. Sunčevo zračenje na Zemlju i pretvorba u druge oblike energije [2] 3
Slika 2. Sustav s jednim spremnikom za pripremu PTV-a [2] 6
Slika 3 Prikaz brzina u turbulentnom graničnom sloju u funkciji udaljenosti od stjenke dana u logaritamskoj skali [5] 11
Slika 4. Akumulacijski spremnik Wolf SEM – 300, FSB Zagreb 15
Slika 5 Primjer relativne satne potrošnje PTV-a u kućanstvu tijekom dana [2] 17
Slika 6. Mjerene vrijednosti efikasnosti pločastog kolektora i regresijski polinom (FSB) [2] 18
Slika 7. Dvodimenzionalna geometrija spremnika 24
Slika 8. Izgled mreže u blizini ulaza u spremnik i oko izmjenjivaća 25
Slika 9. Prikaz podjele spremnika na 13 segmenata jednakih volumena 26
Slika 10. Shematski prikaz vremenske trake računalne simulacije 29
Slika 11. Temperaturno polje u spremniku dobiveno inicijalizacijom uz ljetnom režimu rada solarnog spremnika 30
Slika 12. Temperatura vode po visini spremnika nakon inicijalizacije za ljetni režim rada solarnog spremnika 31
Slika 13. Dijagram uprosječene inicijalne temperature po segmentima spremnika u ljetnom režimu rada koje su dobivene računalnom simulacijom 33
Slika 14. Temperaturno polje i polje brzina strujanja u spremniku nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada solarnog spremnika 34
Slika 15. Temperatura vode po visini spremnika nakon potrošnje PTV-a 35
Slika 16. Usporedba temperature vode po segmentima dobivenih računalnom simulacijom i izračunatih prema normi 37
Slika 17. Temperaturno polje u spremniku nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada 38
Slika 18. Temperature vode po visini spremnika nakon 52 minute zagrijavanja bez potrošnje PTV-a za ljetni režim rada 39
Slika 19. Usporedba srednje temperature vode po segmentima dobivenih računalnom simulacijom i izračunatih prema normi nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada 41
Slika 20. Temperaturno polje u spremniku dobiveno inicijalizacijom za zimski režim rada solarnog spremnika. 42

Slika 21. Temperatura vode po visini spremnika nakon inicijalizacije za zimski režim rada solarnog spremnika 43
Slika 22. Dijagram uprosječene inicijalne temperature po segmentima spremnika u zimskom režimu rada koje su dobivene računalnom simulacijom 45
Slika 23. Prikaz temperaturnog polja u spremnika nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada 46
Slika 24. Dijagramski prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada..... 47
Slika 25. Usporedba srednje temperature vode po segmentima dobivene računalnom simulacijom i izračunatih prema normi nakon 8 minute potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada 49
Slika 26. Temperaturno polje u spremniku nakon 52 minute zagrijavanja solarnim i pomoćnim grijaćima bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada 50
Slika 27. Dijagramski prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada..... 51
Slika 28. Usporedba srednje temperature vode po segmentima dobivene računalnom simulacijom i izračunatih prema normi nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada 53
Slika 29. Promjena temperature radne tvari kolektorskog kruga prolaskom kroz izmjenjivač u spremniku (vrijednost temperature potrošne vode je dobivena računalnom simulacijom). 55
Slika 30. Promjena temperature radne tvari kolektorskog kruga prolaskom kroz izmjenjivač u spremniku (vrijednost temperature potrošne vode je dobivena prema normi)..... 56
Slika 31. Promjena temperature radne tvari kolektorskog kruga prolaskom kroz izmjenjivač u spremniku (vrijednost temperature potrošne vode je dobivena klasičnim termodinimačkim proračunom). 57
Slika 32. Promjena temperature radne tvari kolektorskog kruga prolaskom kroz izmjenjivač u spremniku (vrijednost temperature PTV-a je dobivena prema normi (satna))..... 58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Satne vrijednosti upadnog sunčevog zračenja ma nagnutu plohu kolektora [2] 16
Tablica 2. Tablični prikaz satne potrošnje PTV-a peteročlanog kućanstva 17
Tablica 3 Satne vrijednosti efikasnosti pločastog kolektora za siječanj i srpanj 18
Tablica 4. Tablični prikaz rezultata satne simulacije za siječanj 21
Tablica 5. Tablični prikaz rezultata satne simulacije za srpanj 21
Tablica 6 Tablični prikaz inicijalne temperatura vode na pojedinim visinama u ljetnom režimu rada solarnog spremnika 31
Tablica 7. Tablični prikaz osrednjenih inicijalnih temperatura vode po segmentima spremnika u ljetnom režimu rada 32
Tablica 8. Tablični prikaz temperatura vode na pojedinim visinama spremnika 35
Tablica 9. Tablični prikaz srednje temperature vode po segmentima spremnika izračunatih računalnom simulacijom i prema normi nakon potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada 36
Tablica 10. Tablični prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada 39
Tablica 11. Tablični prikaz temperature vode nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a po segmentima spremnika izračunatih računalnom simulacijom i prema normi 40
Tablica 12. Tablični prikaz inicijalne temperatura vode po visini spremnika u zimskom režimu rada solarnog spremnika 43
Tablica 13. Tablični prikaz osrednjenih inicijalne temperature vode po segmentima spremnika za zimski režim rada solarnog spremnika 44
Tablica 14. Tablični prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada 47
Tablica 15. Tablični prikaz vrijednosti temperature vode po segmentima nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada spremnika izračunatih računalnom simulacijom i prema normi 48
Tablica 16. Tablični prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada 51
Tablica 17. Tablični prikaz vrijednosti temperature vode po segmentima nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada spremnika izračunatih računalnom simulacijom i prema normi 52

Tablica 18. Usporedba stupnjeva efikasnosti pločastog i vakumskog kolektora u slučajevima kada se u proračun ulazilo sa temperaturom potrošne vode dobivene računalnom simulacijom, računom prema normi i klasičnim termodinamičkim proračunom. 59

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
A_{kol}	m^2	površina kolektora
A_i	m^2	površina izmjenjivačke površine u segmentu i
a	m^2/s	koeficijent temperaturne vodljivosti
c_p	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku
c_w	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet vode
C_D		bezdimenzijska funkcija od R_t
C_μ		bezdimenzijska funkcija od R_t
f_i	m/s^2	specifična masena sila u smjeru osi x_i
$\bar{G}$	W/m^3	generacija turbulentne kinetičke energije
G_{sun}	Wh	energija sunčevog upadnog zračenja
h	m	visina spremnika
k	m^2/s^2	turbulentna kinetička energija
k	$W/(m^2K)$	Koeficijent prolaza topline
$\dot{m}$	kg/s	maseni protok PTV-a
$\dot{m}_{kol}$	kg/s	maseni protok radne tvari u kolektoru
p	Pa	tlak
p_{eff}	Pa	efektivni tlak
Q_{kol}	J, Wh	energija koju prikupi kolektor
Q_{PTV}	J, Wh	energija isporučene tople vode
Q_{sprem}	J, Wh	energija koja je akumulirana u spremniku
Q_{pom}	J, Wh	energija pomoćnog grijača
$Q_{t+1,i}$	J, Wh	energija koja se unosi u segment i
$Q_{sto,ls,i}$	J, Wh	gubici energije u segmentu i kroz stjenke spremnika
S_T	W/m^3	funkcija disipacije energije
S		izvorni član
T	K, °C	temperatura
t	s	vrijeme
u_j	m/s	brzina fluida u smjeru osi x_j
u_1^+		bezdimenzionalna brzina

V_{sprem}	m^3	volumen spremnika
$V_{\text{sto;use;W}}$	m^3	volumen isporučene vode
x_j, x_i	m	prostorna koordinata
x_2^+		bezdimenzionalna udaljenost
$\Delta\vec{s}$		vektor pomaka iz središta volumena prema središtu plohe
$\Delta\vartheta$	°C	prirast temperature u spremniku
ε	m^2/s^3	disipacija turbulentne kinetičke energije
ϕ	K, Pa, m/s…	opća zavisna varijabla
$\Phi_{\text{sto;vol;i}}$	W	toplinski tok koji se unosi u segment i
$\nabla\phi_p$		gradijent zavisne varijable ϕ
η_{kol}		stupanj efikasnosti kolektora
Γ		koeficijent difuzije
μ	Pa·s	koeficijent dinamičke viskoznosti
μ_t	Pa·s	turbulentna viskoznost
ν	m^2/s	kinematička viskoznost
ρ	kg/m^3	gustoća
σ_k		turbulentni Prandtl-ov broj za k
σ_ε		turbulentni Prandtl-ov broj za ε
τ_{stij}	N/m^2	viskozno tangencijalno naprezanje na stijenci
$\vartheta_{f,sr}$	°C	srednja temperatura radne tvari kolektorskog kruga
$\vartheta_{\text{kol;izlaz;i}}$	°C	temperatura radne tvari kolektorskog kruga na izlazu iz izmjenjivača topline
$\vartheta_{\text{kol;ulaz;i}}$	°C	temperatura radne tvari kolektorskog kruga na ulazu u izmjenjivač topline
$\vartheta_{\text{kol;sr;i}}$	°C	srednja temperatura radne tvari u izmjenjivaču topline
ϑ_z	°C	temperatura vanjskog zraka
ϑ_{s1}	°C	temperatura vode u spremniku na početku sata
ϑ_{s2}	°C	temperatura vode u spremniku na kraju sata
ϑ_{svj}	°C	temperatura ulazne vode u spremnik
ϑ_{set}	°C	postavna temperatura vode u spremniku
$\vartheta_{\text{sto;vol;i}}$	°C	temperatura vode u segmentu i
$\vartheta_{sr;i}$	°C	Srednja temperatura vode u segmentu i
ϑ	°C	temperatura

SAŽETAK

Napravljen je numerički model dinamičke simulacije solarnog spremnika za zimski i ljetni režim rada koji uključuje period sa potrošnjom i bez potrošnje PTV-a. Dobiveni rezultati temperaturnog polja koje je izračunato u programu ANSYS Fluent su uspoređeni sa vrijednostima dobivenim proračunom prema normi HRN EN 15316-5:2017 (podjela na više kontrolnih volumena). Napravljena je analiza utjecaja na stupanj efikasnosti pločastog i vakuumskog kolektora u slučajevima kada se u proračun izmjene topline između radne tvari kolektorskog kruga i potrošne vode ulazilo sa vrijednostima PTV-a dobivenim računalnom simulacijom, prema normi i klasičnim termodinamičkim proračunom.

Ključne riječi: Solarni akumulacijski spremnik, stupanj iskoristivosti , kolektor, temperatura, izmjenjivač topline

SUMMARY

A numerical model of a dynamic simulation of a solar storage tank was made, for winter and summer working mode, including a period with and witout consumption of DHW. The results of the temperature field calculated in the ANSYS Fluent program are compared with the values obtained by the calculation according to the HRN EN 15316-5: 2017 norm (division into multiple control volumes). An analysis was made of the impact on the degree of efficiency of the plate and vacuum collectors in cases when the calculation of the heat exchange between the heat transfer fluid and consumable water entered the DHW values obtained by computer simulation, according to the norm and the classical thermodynamic calculation.

Key words: Solar storage tank, degree of usability, collector, temperature, heat exchanger

1. UVOD

U sklopu diplomskog rada je razvijen numerički model za dinamičku simulaciju rada akumulacijskog spremnika solarnog toplovodnog sustava za pripremu potrošne tople vode. Odabran je solarni sustav sa prisilnom cirkulacijom radnog fluida u solarnom krugu koji ima jedan akumulacijski spremnik za pripremu PTV-a (potrošna topla voda) te je proveden proračun satne simulacije u karakterističnom danu za siječanj i srpanj. Tim se proračunom na temelju potrošnje PTV-a i količine dozračene energije na kolektorsku površinu računa odvedena i dovedena energija u spremnik tijekom jednog sata. Slijedom toga se izračunava promjena temperature potrošne vode u spremniku tijekom svakog sata i energija potrebna za dogrijavanje na postavljenu temperaturu, zatim se određuje nazivni toplinski učin pomoćnog grijača. Proračun se vodi iterativno te se po potrebi podešavaju površina kolektora i zapremnina spremnika ukoliko proračun ne zadovoljava .

Proračunom satne simulacije spremnika dobivaju se srednje vrijednosti temperature vode u akumulacijskom spremniku što nam ne daje jasnu sliku strujanja i temperaturnog polja u pojedinim dijelovima spremnika. Proračun također ne uzima u obzir geometriju spremnika i izmjenjivačkih površina koje utječu na izgled temperaturnog polja unutar spremnika.

Za jasniji uvid u dinamičke karakteristike unutar spremnika razvijen je numerički model čija su rješenja dobivena računalnom simulacijom. Računalna simulacija polja dinamika fluida je danas sve raširenija te je u većini slučajeva povoljnija od izrade prototipova. Simulacija je provedena za ljetni i zimski režim rada sa potrošnjom i bez potrošnje PTV-a. Simulacija je provedena u računalnom programu ANSYS Fluent. Dobiveni rezultati dinamičke simulacije su na kraju uspoređeni sa rezultatima satnog proračuna spremnika tople vode podijeljenog na više kontrolnih volumena sukladno normi HRN EN 15316-5:2017.

Dobiveni rezultati temperaturnog polja u spremniku su posebno zanimljivi u pogledu utjecaja na efikasnost kolektora. Za veću efikasnost kolektora potrebno je da radni fluid iz solarnog kruga izlazi iz spremnika sa što nižom temperaturom. Teži se tome da se što više topline izmjeni između radne tvari iz solarnog kruga i potrošne vode uz što manju razliku temperature radnog medija i vode u spremniku, stoga je zanimljivo vidjeti kako izgleda temperaturno polje u donjem dijelu spremnika gdje se i nalaze izmjenjivači solarnog kruga.

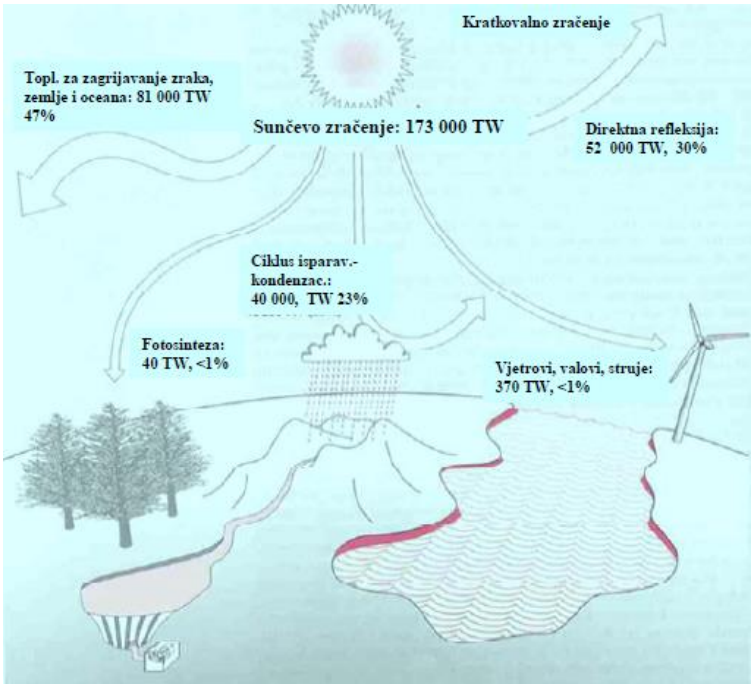
2. ENERGIJA SUNCA

Porastom ukupne ljudske populacije na planeti Zemlji rastu i potrebe za energetskom opskrbom. Energija se u raznim oblicima koristi za aktivnosti u transportu, industriji i zgradarstvu. Danas se gotovo 81.5% svjetske energetske potražnje zadovoljava iz pretvaranja kemijske energije fosilnih goriva u toplinsku koja se potom može pretvarati u druge oblike (mehaničku i električnu), 13.6% iz obnovljivih izvora te 4.9% iz nuklearne energije [3]. Zbog povećane eksploatacije i smanjenja rezervi fosilnih goriva u obzir sve više dolazi dobivanje energije iz obnovljivih izvora energije (energija vjetra, hidroenergija, energija valova, morskih struja, solarna, geotermalna, biomasa). Postoje i ekološki razlozi zbog kojih se teži upotrebi obnovljivih izvora energije. Izgaranjem fosilnih goriva oslobađa se ugljik koji odlazi u atmosferu u obliku stakleničkog plina ugljikovog dioksida. Pojačava se efekt staklenika te dolazi do povećanja globalne temperature na Zemlji koje izaziva negativne efekte na biosferu. Razvojem tehnologija i inovativnih rješenja, energija iz obnovljivih izvora iskorištavaju se efikasnije i ekonomičnije unatoč tome što su konvencionalna fosilna goriva i dalje jeftinija i neizostavna pogotovo u industriji i transportu.

Energija sunca koja dolazi do zemlje je praktički beskonačna u odnosu na globalne potrebe za energijom, ali postoje problemi u njenom iskorištavanju. Sunčeva energija je inetermitentnog karaktera i male energetske gustoće te je zbog toga vrlo nepouzdan oblik energije. Tri su glavna načina korištenja sunčeve energije: pretvorba u toplinsku energiju i električnu te dobivanje energije iz biomase. Fotonaponske ćelije izravno pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju dok solarni kolektori apsorbiraju sunčevo zračenje koje predaje toplinu radnom mediju u kolektorskom krugu, a zatim se ta toplina može koristiti kao toplinska energija za pripremu potrošne tople vode ili grijanje ili se može daljnjim postupcima pretvarati u električnu energiju. Izravna pretvorba sunčeve energiju u električnu je zadnjih godina pojeftinila, ali je i dalje vrlo skupa zbog cijene fotonaponskih ćelija i skupe tehnologije izrade istih [1].

2.1. Sunčevo zračenje

Gotovo svi izvori energije na Zemlji imaju svoje korijene u sunčevoj energiji. Na slici 1. je ilustrirano kako energija sunčevog zračenja utječe na pojave drugih oblika energije na Zemlji. Fosilna goriva su nastala od životinjskih i biljnih organizama koji koriste sunčevu energiju za proces fotosinteze kojom se izdvaja ugljik iz ugljikovog dioksida u zraku i pohranjuje u biljku. Energija valova je posljedica energije vjetra koja nastaje uslijed razlike tlakova odnosno temperature zraka. Ta temperaturna razlika je posljedica različite progrijanosti zraka koji se zagrijava konvekcijom topline sa tla koje je tu toplinu primilo od sunčevog zračenja. Energija tokova rijeka koje vodu dobivaju iz padalina također ima izvorište u sunčevoj energiji. Energija sunca isparava vodu sa kopna i sa vodenih površina koja se onda u obliku padalina nađe na većim geodetskim visinama.



Slika 1. Sunčevo zračenje na Zemlju i pretvorba u druge oblike energije [2]

Na granicu atmosfere se dozrači 173 000 TW od kojih se 120 000 TW apsorbira u atmosferi, tlu i vodama, a ostatak dozračene energije se izravno od atmosfere reflektira u svemir. Dozračena energija na površinu ima malu gustoću energetskog toka (< 1 kW/m^2) što predstavlja problem u pogledu iskorištavanja sunčeve energije. Spektralna raspodjela intenziteta zračenja je slična crnom tijelu. Oko 48% zračenja se nalazi u vidljivom spektru, 42.4% u kratkovalnom i 0.6% u UV spektru. Ekstraterističko sunčevo zračenje dospjelo do

zemljine površine odgovara površini ispod dijagrama intenziteta sučevog zračenja, a 30 % tog zračenja se odmah reflektira nazad u svemir dok se ostatak zračenja najviše apsorbira u zemljinu površinu. Sunčevo zračenje na površinu dolazi direktno i difuzno zbog raspršenja direktnog zračenja na oblacima [1]. Apsorbirano zračenje zagrijava zemlju koja isparavanjem, zračenjem i konvekcijom predaje dio topline atmosferi dok se dio energije vraća nazad u svemir zemljinim zračenjem u dugovalnom infracrvenom spektru. Sunčevo zračenje varira tijekom dana zbog rotacije zemlje oko vlastite osi. Zračenje tijekom godine varira zbog promjenjivog kuta upada sunčevog zračenja koje je posljedica rotacije zemlje oko sunca. Insolacija je godišnja količina zračenja na horizontalnu plohu koja za područje Zagreba iznosi 1200 kWh/m^2, a najveći dio je dozračen u toplijem dijelu godine[2].

3. SUNČANI TOPLOVODNI SUSTAVI ZA PRIPREMU PTV-A

Danas se u najvećoj mjeri koriste sunčani toplovodni sustavi za pripremu potrošne tople vode (PTV). Postoje i sustavi koje uključuju grijanje prostora i bazena, ali oni se manje upotrebljavaju zbog činjenice da je manja potreba za grijanjem prostora i bazena upravo u ljetnom periodu kada je proizvodnja tople vode najveća.

Osnovni dijelovi sustava su sunčevi kolektori i akumulacijski spremnik u kojem se skladišti topla voda. Radni fluid u kolektorima je voda ili mješavina vode i glikola koja je otporna na smrzavanje. Cirkulacija radnog fluida se može odvijati prisilno uz korištenje cirkulacijskih pumpi ili prirodnom cirkulacijom koja je ostvarena uzgonom fluida zbog temperaturne razlike. Za razliku od sustava sa prirodnom cirkulacijom radnog fluida gdje akumulacijski spremnik mora biti na najvišoj točki sustava (najčešće na krovu), akumulacijski spremnik kod sustava sa prisilnom cirkulacijom se smješta u samom objektu gdje je bolje očuvan od atmosferskih uvjeta i toplinskih gubitaka.

Od ostalih dijelova opreme tu su još ventili i ekspanzijska posuda koja prima višak vode iz spremnika i koletorskog kruga i osigurava stalni radni tlak u sustavu. Cjevovodi moraju biti što je moguće kraći i izolirani kako bi se smanjili gubici tlaka i topline. Nepovratni ventili se ugrađuju kako bi se spriječilo rashlađivanje spremnika. Automatska regulacija sustava se koristi kako bi se poboljšala efikasnost cijelog sustava, a sastoji se od upravljačke jedinice, osjetnika temperature radnog fluida koji se nalazi na izlazu iz kolektora i na raznim pozicijama u spremniku. Osjetnici temperature potrošne vode se nalaze u spremniku iznad izmjenjivača kolektorskog kruga[2].

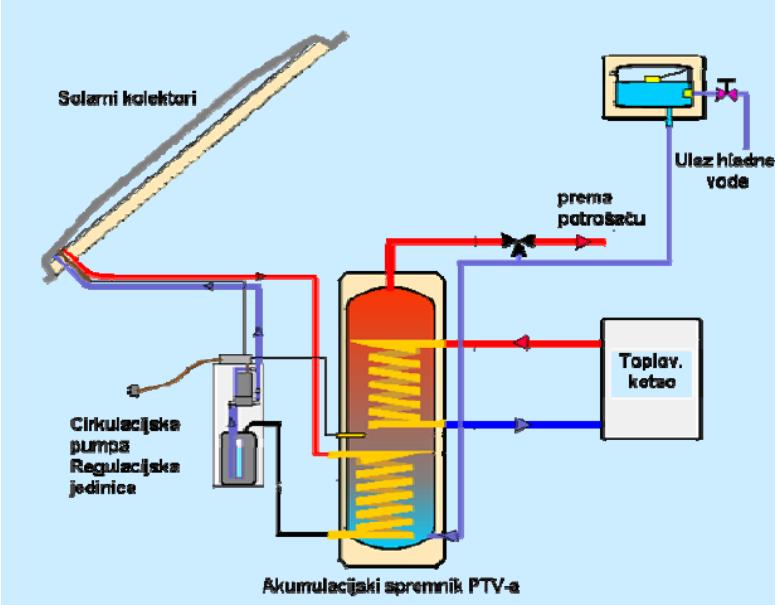
Sustavi sa prisilnom cirkulacijom mogu biti izvedeni na više načina:

- Sustav sa jednim spremnikom za pripremu PTV-a
- Toplovodni sustavi sa dvostrukim spremnikom
- Sustavi s protočnim grijačem (izmjenjivačem) PTV-a
- Toplovodni sustavi s dva spremnika
- Sustavi s pločastim izmjenjivačem topline kolektorskog kruga koji se koriste u prehrambenoj industriji

Na slici 2. prikazana je shema jednostavnog sustava za pripremu PTV-a. Akumulacijski spremnik je izveden sa cijevnim spiralnim izmjenjivačima solarnog i pomoćnog izmjenjivača topline. Ulaz potrošne vode se nalazi na dnu, a izlaz na vrhu spremnika gdje se zbog

uzgonskog djelovanja nalazi voda više temperature. Radni fluid nakon izlaska iz kolektora ulazi u spremnik na gornjem toplijem dijelu spremnika, a izlazi iz spremnika u nižim hladnijim dijelovima zbog efikasnije izmjene topline između fluida kolektorskog kruga i potrošne vode.

Direktan prodor hladne vode u toplije gornje slojeve spremnika može se spriječiti skretačima mlaza koji su postavljeni iznad ulaza hladne vode u spremnik.



Slika 2. Sustav s jednim spremnikom za pripremu PTV-a [2]

4. ZAKONI DINAMIKE FLUIDA

Osnovni zakoni dinamike fluida se temelje na zakonima klasične fizike u koje spadaju

1. Zakon očuvanja mase
2. Zakon očuvanja količine gibanja
3. Zakon očuvanja momenta količine gibanja
4. Zakon očuvanja energije
5. Drugi zakon termodinamike

Tako objedinjeni zakoni dinamike fluida se zovu Oberbeckov sustav jednadžbi koja za stacionarno ($\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$) i laminarno nestlačivo ($\rho = konst.$) strujanje u diferencijalnom obliku glase:

jednadžba kontinuiteta (zakon očuvanja mase)

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{4.1}$$

jednadžba količine gibanja u smjeru osi x_i

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + f_i \tag{4.2}$$

zakon održanja energije

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_j T)}{\partial x_j} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2}\right) + \frac{1}{\rho c_p} S_T \tag{4.3}$$

Gdje član S_T predstavlja funkciju disipacije energije po jedinici volumena uzrokovanu viskoznim djelovanjem na česticu fluida.

4.1. Turbulentno strujanje

Turbulentno strujanje se javlja pri visokim vrijednostima Reynoldosva broja i najčešći je pojavni oblik strujanja u prirodi. Takvo strujanje je izuzetno složenog karaktera i može se predočiti na način da se pojedina veličina u nekoj točki prostora prikaže kao zbroj statički u vremenu osrednjene veličine i pulsirajućeg dijela. Ako se osrednjene vrijednosti brzine, tlaka i temperature ne mijenjaju u vremenu, tada se govori o kvazistacionarnom strujanju, iako je turbulentno strujanje samo po sebi nestacionarno [6].

Jednadžbe kontinuiteta i količine gibanja za kvazistacionarno turbulentno strujanje glase:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{4.4}$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \left(\bar{u}_i \bar{u}_j\right)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right) - \rho \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\acute{u}_\imath \acute{u}_j}\right) \tag{4.5}$$

Posljednji član u gornjoj jednadžbi je fiktivni doprinos smičnih naprezanja (Reynolds-ova naprezanja) nastalih uslijed djelovanja oscilirajućih komponenti brzina. Zbog nelinearnosti člana $\overline{\acute{u}_\imath \acute{u}_j}$ u znanosti su razvijeni različiti modeli Reynoldsovih naprezanja. Jedan od tih modela je *k*-$\bar{\varepsilon}$ model koji je dostupan u programskom paketu ANSYS Fluent-u.

Model *k*-$\bar{\varepsilon}$ je zasnovan na Boussinesq-ovoj hipotezi koja uvodi dinamički koeficijent turbulentne viskoznosti μ_t (funkcija lokalnog uvjeta strujanja) i tlak uslijed turbulentnih pulzacija brzine koji je izražen preko turbulentne kinetičke energije $\bar{k}$. Implementacijom Boussineq-ove hipoteze u Reynoldsovu jednadžbu dobiva se

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \left(\bar{u}_i \bar{u}_j\right)}{\partial t} = -\frac{\partial p_{eff}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t)\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right] \tag{4.6}$$

gdje je efektivni tlak p_{eff}

$$p_{eff} = \bar{p} + \frac{2}{3}\rho \bar{k} \tag{4.7}$$

Određivanje turbulentne viskoznosti μ_t u k-$\bar{\varepsilon}$ modelu predstavlja problem te je potrebno riješiti dodatne dvije transportne jednadžbe za k i $\bar{\varepsilon}$ gdje $\bar{\varepsilon}$ predstavlja disipaciju turbulentne kinetičke energije.

4.2. Određivanje turbulentne viskoznosti

Transportne jednadžbe koje opisuju raspodjelu k i $\bar{\varepsilon}$ u turbulentnom strujanju su:

$$\rho\frac{\partial\bar{k}}{\partial t}+\rho\frac{\partial\left(\bar{u}_j\bar{k}\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial\bar{k}}{\partial x_j}\right]+\bar{G}-\rho\bar{\varepsilon} \tag{4.8}$$

$$\rho\frac{\partial\bar{\varepsilon}}{\partial t}+\rho\frac{\partial\left(\bar{u}_j\bar{\varepsilon}\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\bar{\varepsilon}}{\partial x_j}\right]+C_1\bar{G}\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{k}}-C_2\rho\frac{\bar{\varepsilon}^2}{\bar{k}} \tag{4.9}$$

Gdje je $\overline{G}$ generacija turbulentne kinetičke energije

$$\bar{G}=\mu_t\left(\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}+\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}\right)\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} \tag{4.10}$$

Prandl-Kolmogorovim opisom karakteristične brzine pulzacija i dimenzijskom analizom možemo turbulentnu viskoznost zapisati u obliku

$$\mu_t=\rho C_\mu C_D\frac{\bar{k}^2}{\bar{\varepsilon}} \tag{4.11}$$

Gdje su σ_k i σ_ε su karakteristike geometrije i lokalnih uvjeta strujanja (turbulentni Prandtl-ovi brojevi). U tablici 1. su prikazane eksperimentalno određene konstante transportnih jednadžbi.

Tablica 1. Eksperimentom određene konstante transportnih jednadžbi za k - $\bar{\varepsilon}$ model Reynolds-ovih naprezanja [5]

C_μ	C_D	σ_k	σ_ε	C_1	C_2
1.0	0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

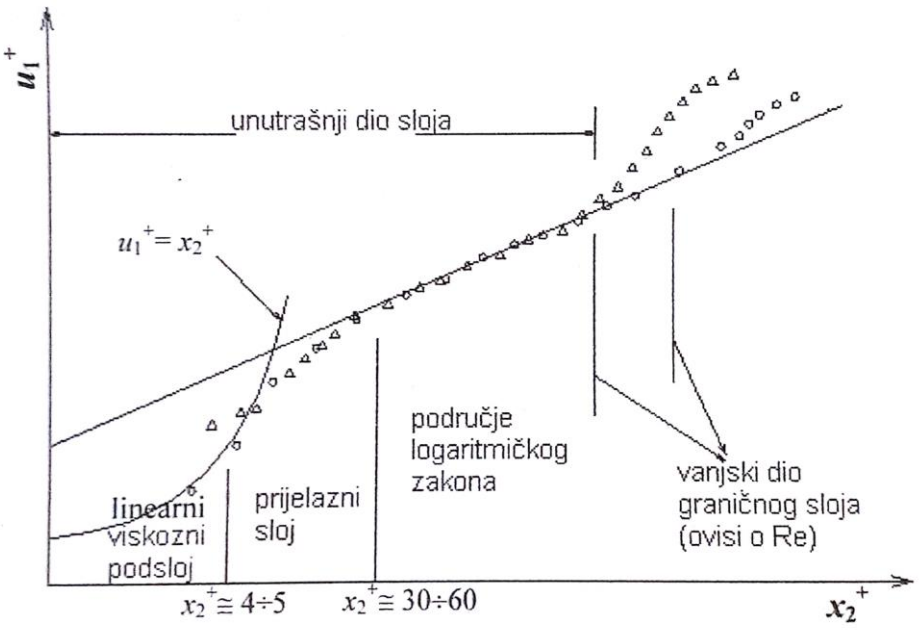
Ostali modeli kojima se modeliraju Reynolds-ova naprezanja i spominju se u literaturi su: RNG k i $\bar{\varepsilon}$ model i RSM model koji su također dostupni u programu ANSYS-Fluent [5].

4.3. Model strujanja u blizini stjenke

Znanstvenici su utvrdili da je strujanje u blizini čvrste stjenke drugačijeg karaktera od turbulentnog strujanja dovoljno udaljenog od stjenke [5]. Kod laminarnog strujanja u blizini stjenke pojavljuje se granični sloj u kojem se brzina mijenja od 0 m/s na samoj stjenci do ruba graničnog sloja gdje je brzina jednaka brzini protoka. Taj gradijent brzina u graničnom sloju je posljedica viskoznih sila koje su dominantne u području blizu stjenke dok se podalje od stjenke viskozne sile mogu zanemariti. Debljina graničnog sloja se na nekoj udaljenosti ustali pa se tada govori o izobraženom profilu brzina strujanja [6].

Kod izobraženog turbulentnog strujanja u blizini čvrste stjenke pojavljuje se turbulentni granični sloj koji je tanji od laminarnog graničnog sloja te su zbog toga gradijenti brzina u graničnom sloju veći kod turbulentnih strujanja. Zbog većih gradijenata brzina je povećana disipacija energije kod turbulentnog strujanja.

Turbulentno strujanje u blizini čvrste stjenke se može promatrati u dva slučaja. U prvom slučaju u neposrednoj blizini stjenke su prigušene turbulentne pulsacije samom stjenkom te je u tom području molekularna viskoznost znatno veća od turbulentne viskoznosti ($\mu \ll \mu_t$). U drugom slučaju podalje od stjenke se zanemaruje molekularna viskoznost ($\mu \gg \mu_t$). Implementiranjem tih pretpostavki te uvođenjem bezdimenzionalne brzine u_1^+ i bezdimenzionalne udaljenosti x_2^+ dobiven je dijagram na slici 3. gdje se vide raspodjele brzina strujanja u turbulentnom graničnom sloju koje su i eksperimentalno potvrđene.



Slika 3 Prikaz brzina u turbulentnom graničnom sloju u funkciji udaljenosti od stjenke dana u logaritamskoj skali [5]

Jednadžbe za bezdimenzionalnu brzina u_1^+ i bezdimenzionalnu udaljenost x_2^+ glase

$$u_1^+ = \frac{\bar{\bar{u}}_1}{\sqrt{\tau_{stij}/\rho}} \tag{4.12}$$

$$x_2^+ = \frac{\rho \cdot x_2}{\mu} \sqrt{\tau_{stij}/\rho} \tag{4.13}$$

$\bar{u}_1$ je osrednjana brzina turbulentnog strujanja, x_2 je udaljenost od stijenke, a τ_{stij} je viskozno smično naprezanje na stijenci. U linearnom viskoznom podsloju vrijedi $u_1^+ = x_2^+$. U inercijalnom posloju gdje je veći utjecaj turbulentne viskoznosti vrijedi logaritmički profil brzine $u_1^+ = \frac{1}{\kappa}\ln(Ex_2^+)$.

5. DISKRETIZACIJA OSNOVNIH JEDNADŽBI DINAMIKE FLUIDA

Parcijalne diferencijalne jednadžbe osnovnih zakona dinamike fluide nije moguće riješiti analitički. Potrebno je diskretizirati jednadžbe kako bi se dobio sustav algebarskih jednadžbi koje se zatim numerički rješavaju.

Osnovni zakoni dinamike fluida i jednadžbe za k i ε mogu se zapisati u općem obliku koji glasi:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \phi)}{\partial x_j} = \Gamma \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} + S \tag{5.1}$$

gdje ϕ predtavlja pojedinu fizikalnu veličinu, Γ koeficijent difuzije, a S izvorni član.

Podjelom domene na više kontrolnih volumena i transformacijom volumnog u površinski integral, jednadžba (4.1) postaje

$$\sum_{p}^{n_ploha} \vec{u}_p \cdot \phi_p \cdot \vec{A}_p = \sum_{p}^{n_ploha} \Gamma \cdot (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_p + S \cdot \Delta V \tag{5.2}$$

ϕ_p je vrijednost na plohi p kontrolnog volumena, a $(\nabla \phi)_n$ je gradijent u smjeru normale na plohu p. Lijeva strana jednadžbe (5.2) je konvektivni član, a prvi član s desne strane je difuzijski član.

Plošna vrijednost ϕ_p konvektivnog člana se može diskretizirati interpolacijskom shemom "upwind shema" drugog reda točnosti

$$\phi_p = \phi_{c0} + \nabla \phi_p \cdot \Delta \vec{s} \tag{5.3}$$

Gdje je ϕ_{c0} vrijednost u središtu kontrolnog volumena , a $\nabla \phi_p$ gradijent u smjeru strujanja koji se dalje diskretizira te postaje

$$\nabla \phi_p = \frac{1}{\Delta V} \sum_{p}^{n_ploha} \bar{\phi}_p \cdot \vec{A} \tag{5.4}$$

$\bar{\phi}_p$ se dobije aritmetičkim osrednjavanjem vrijednosti u središtima susjednih kontrolnih volumena. Istim postupkom se diskretizira i difuzijski član jednadžbe (4.2). Jednadžba (4.2) je i dalje nelinearna te je potrebno linearizirati koeficijente na plohama kontrolnog volumena [3].

5.1. Algoritam rješavanja diskretiziranih jednadžbi

Algoritam "segregated solver" je korišten za numeričko rješavanja diskretiziranih jednadžbi. Da bi se dobile sve zavisne varijable potrebno je provesti više iteracija. Unutar svake iteracije se provode slijedeći postupci:

1. Izračun karakteristike fluida pretpostavljanjem ili prethodnom iteracijom izračunatom vrijednosti
2. Rješavanje jednadžbi količine gibanja i korekcijske jednadžbe tlaka da se zadovolji jednadžba kontinuiteta
3. Nakon definiranja polja brzina rješavaju se energetske jednadžbe i transportne k i ε jednadžbe

5.2. Interpolacijska shema tlaka

Jednadžbu količine gibanja nije moguće riješiti bez poznavanja tlakova na površinama kontrolnih volumena. U ovom modelu je odabrana "body force weighted" interpolacijska shema tlaka koja je pogodna za strujanja sa intenzivniji uzgonskim silama. Tlak na površini kontrolnog volumena se računa pretpostavkom da je gradijent tlaka i uzgonskih sila konstantan u smjeru normale na plohu [5].

5.3. Korekcije tlaka i brzine

U programskom paketu ANSYS-Fluent dostupna je opcija "Simple algoritam" kojom se izračunavaju polja brzine i polja tlaka. Pretpostavljenim poljem tlaka dobivamo "nekorektnu" vrijednost polja brzine iz jednadžbe količine gibanja. Dobivena brzina ne zadovoljava jednadžbu kontinuiteta stoga je nekorektnu vrijednost brzine potrebno korigirati. Tlak se

korigira podrelaksacijskim faktorom koji utječe na konvergenciju rješenja. Tu dobivenu korigiranu vrijednost tlaka se koristi kao pretpostavljeni tlak u idućoj iteraciji.

5.4. Courantov broj

Courantov broj govori o tome da li veličina elementa na koje je prostorna domena podijeljena i odabrani vremenski korak zadovoljavaju uvjet konvergencije rješenja. Praćenje Couranotovog broja je bitno kod tranzijentnih strujanja čija je stabilnost uvjetovana slijedećim izrazom

$$\mathrm{Co} = v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \tag{5.5}$$

Gdje član v predstavlja brzinu strujanja, Δx je veličina elementa, a Δt je vremenski korak.

Uvjet iz jednadžbe 5.5 ograničava gibanje čestice fluida kroz više elemenata u jednom vremenskom koraku.

6. ZAPREMNINA SPREMNIKA I TOPLINSKI UČIN IZMJENJIVAČA SOLARNOG KRUGA I POMOĆNOG GRIJAČA

Za potrebe ovog rada je odabran solarni sustav sa prisilnom cirkulacijom i jednim spremnikom za pripremu PTV-a (slika 2.). Izmjena topline između potrošne vode i medija iz solarnog kruga se vrši preko spiralnog cijevnog izmjenjivača u donjoj polovici spremnika. Voda iz solarnog kruga ulazi u solarni spremnik u gornjem dijelu, a izlazi u donjem dijelu spremnika gdje se nalazi ulaz hladnije potrošne vode. Iznad izmjenjivača solarnog kruga se nalazi pomoćni grijač koji po potrebi dogrijava vodu do postavljene temperaturne vrijednosti. Primjer takvog 300 litarskog spremnika je u laboratoriju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu i prikazan je na slici 4. Akumulacijski spremnik Wolf SEM – 300 je korišten u studentskom projektu "Solarna dizalica topline" pod mentorstvom dr.sc. Vladimira Solde . Geometrija tog spremnika je korištena za razvijanje numeričkog modela dinamičke simulacije.



Slika 4. Akumulacijski spremnik Wolf SEM – 300, FSB Zagreb

6.1. Satna simulacija sustava

Potrebno je kvalitetno dimenzionirati toplovodni sunčani sustav kako bi se zadovoljile potrebe za toplinskom energijom. Simulacija sustava na satnoj razini je provedena za karakteristične dane u siječnju i srpnju što je sasvim zadovoljavajuće za potrebe ovog rada. Proračun je proveden za prethodno odabrani akumulacijski spremnik na temelju potrošnje tople vode i dozračene energije na kolektorsku površinu. Tim proračunom se na temelju potrošnje i zagrijavanja tople vode dobiju dinamičke karakteristike sustava tijekom cijelog dana u karakterističnom mjesecu. U proračunu se usklađuju površina kolektora, zapremnina, toplinski učinak kolektora i snaga pomoćnog grijaća kako bi se dobio optimalni sustav [2].

6.1.1. Upadno zračenje na kolektor

Podatci za energiju sunčevog upadnog zračenja G_{sun} (satne vrijednosti za siječanj i srpanj) na nagnutu plohu kolektora za područje Zagreba su dani u tablici 1.

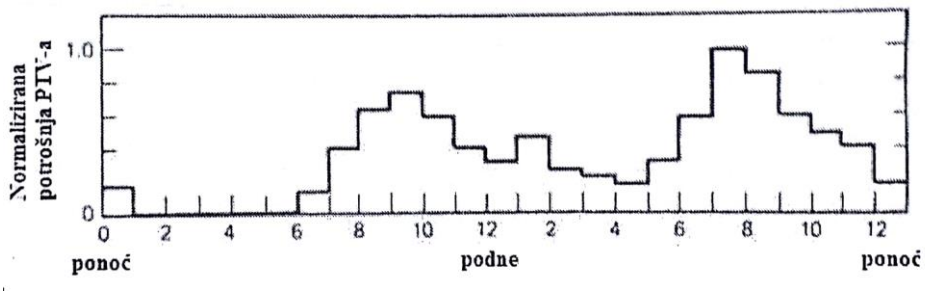
Tablica 1. Satne vrijednosti upadnog sunčevog zračenja ma nagnutu plohu kolektora [2]

	G_{sun} (Wh)	
sat	Siječanj	Srpanj
4-5	0	11.9
5-6	0	65.4
6-7	0	157.2
7-8	14.1	263.4
8-9	67.4	378.1
9-10	153.6	479.3
10-11	230.4	555.7
11-12	288.4	590.6
12-13	304.1	593.1
13-14	263.4	553.2
14-15	183.4	476.7
15-16	84.6	376.4
16-17	17.2	277.0
17-18	0	163.2
18-19	0	67.1
19-20	0	11.9

6.1.2. Satna potrošnja PTV-a

Dnevna potrošnja tople vode u kućanstvu ovisi o broju potrošača, navikama i potrebama pojedinog kućanstva. Stoga se za dnevnu potrošnju PTV-a u kućanstvu uzima prosječna vrijednost potrošnje po osobi koja iznosi približno 50 litara po danu. Solarni sustav je namijenjen za 5 članova kućanstva kojima je potrebno 250 litara dnevno PTV-a.

Potrošnja PTV-a nije jednolika tijekom dana stoga je konstruirana satna potrošnja preko stupčanog dijagrama relativne potrošnje tople vode prikazanog na slici 4.



Slika 5 Primjer relativne satne potrošnje PTV-a u kućanstvu tijekom dana [2]

Period potrošnje od ponoći do jedan ujutro nije uzet u obzir. Dobivene satne vrijednosti potrošnje PTV-a $\dot{m}$ peteročlanog kućanstva su prikazane u tablici 2.

Tablica 2. Tablični prikaz satne potrošnje PTV-a peteročlanog kućanstva

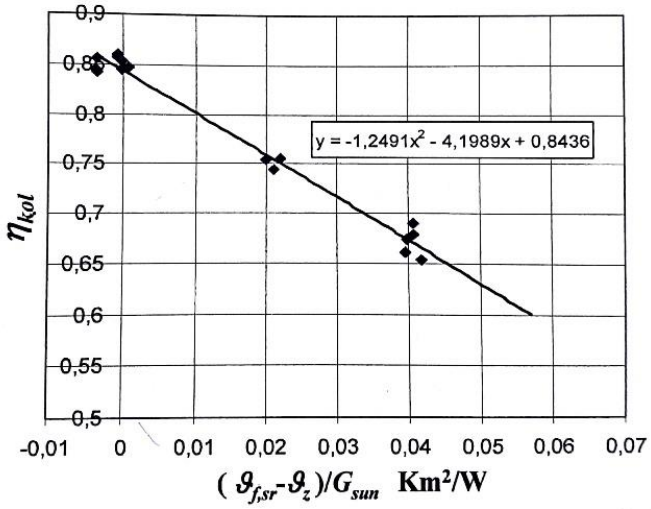
Sat h	$\dot{m}$ kg/h		Sat h	$\dot{m}$ kg/h
4-5	0		14-15	8.571
5-6	0		15-16	7.143
6-7	5.143		16-17	5.714
7-8	11.714		17-18	11.429
8-9	17.714		18-19	17.714
9-10	20.000		19-20	28.571
10-11	17.143		20-21	24.286
11-12	11.429		21-22	17.714
12-13	7.143		22-23	14.857

13-14	12.286		23-24	11.429

6.1.3. Efikasnost pločastog kolektora

Efikasnost kolektora je udio solarne toplinske energije koja se predaje vodi i energije sunčevog upadnog zračenja G_{sun}. Podatke o efikasnosti kolektora daje proizvođač, a oni se najčešće određuju eksperimentalno [2].

Za potrebe ovog rada korišten je polinom dobiven regresijskom analizom eksperimentalnih podataka na pločastom kolektoru (FSB, Zagreb [2]). Na slici 6. je prikazana efikasnost kolektora η_{kol} u funkciji $(\vartheta_{f,sr} - \vartheta_z)/G_{sun}$, pri čemu je ϑ_z temperatura vanjskog zraka, a $\vartheta_{f,sr}$ srednja temperatura radnog fluida u kolektorskom krugu.



Slika 6. Mjerene vrijednosti efikasnosti pločastog kolektora i regresijski polinom (FSB) [2]

U tablici 3. su prikazane satne vrijednosti efikasnosti kolektora u siječnju i srpnju pri čemu je za temperaturu vanjskog zraka uzeto da je $\vartheta_z = -1$ °C za siječanj i $\vartheta_z = -26$ °C za srpanj. Srednja temperatura radnog fluida u sječnju je $\vartheta_{f,sr}$= 30 °C, dok je u srpnju $\vartheta_{f,sr} = 50$ °C.

Tablica 3 Satne vrijednosti efikasnosti pločastog kolektora za siječanj i srpanj

	η_{kol} (-)	
sat	Siječanj	Srpanj
4-5	0	0
5-6	0	0
6-7	0	0.17

7-8	0	0.45
8-9	0	0.57
9-10	0.32	0.63
10-11	0.49	0.66
11-12	0.54	0.67
12-13	0.54	0.67
13-14	0.46	0.66
14-15	0.25	0.63
15-16	0	0.57
16-17	0	0.47
17-18	0	0.20
18-19	0	0

6.1.4. Prikupljena energija na kolektoru

Energija koju kolektor prikupi od sunčevog zračenja u jednom satu se računa prema slijedećem izrazu

$$Q_{kol} = \eta_{kol} \cdot G_{sun} \cdot A_{kol} \cdot t \tag{6.1}$$

Q_{kol} je u jedinici Wh, pri čemu je t=1 h. Površina kolektora je određena prema unaprijed određenoj zapremnini spremnika. U proračun se ušlo sa površinom kolektora $A_{kol} = 4$ m^2.

6.1.5. Energija odvedena iz spremnika

Energija odvedena iz spremnika tijekom jednog sata se računa prema slijedećoj jednadžbi

$$Q_{PTV} = \dot{m} c_p \left(\vartheta_{s1} - \vartheta_{svj}\right) \cdot t \tag{6.2}$$

gdje je ϑ_{s1} temperatura vode u spremniku na početku sata, a vrijednost temperature sviježe napojne vode ϑ_{svj} je 15 °C. Ovdje je potrebno napomenuti da je u proračunu temperatura vode u spremnika homogena (nema temperaturne stratifikacije po visini spremnika).

6.1.6. Akumulirana energija u spremniku

Energija koja se akumulira u solarnom spremniku tijekom sat vremena se računa prema

$$Q_{sprem} = Q_{kol}\eta_g - Q_{PTV} \tag{6.3}$$

Gdje je zbog gubitaka u cjevovodu i izmjenjivaču uzeto da je η_g=0.95

6.1.7. Prirast temperature u spremniku

Jednadžba za prirast temperature PTV-a u spremniku tijekom jednog sata glasi

$$\Delta\vartheta = \frac{Q_{sprem}}{V_{sprem} \cdot \rho \cdot c_p} \tag{6.4}$$

Zbrajanjem prethodne jednadžbe i temperature vode u spremniku na početku sata ϑ_{s1} dobivamo srednju temperaturu spremnika na kraju sata koja iznosi

$$\vartheta_{s2} = \vartheta_{s1} + \Delta\vartheta \tag{6.5}$$

Temperatura u spremniku na kraju sata se uzima kao početna temperatura na početku idućeg sata. Provodi se iteracija kroz nekoliko dana karakterističnog mjeseca i potrebno je paziti da temperatura u spremniku tijekom ljetnih mjeseci ne premaši 55 °C jer bi to smanjilo učinkovitost izmjenjivača topline u spremniku. Temperatura na kraju dana se umanji za 3 °C zbog toplinskih gubitaka tijekom noći te se sa tom temperaturom ulazi u proračun za idući dan. Temperatura ne bi trebala pasti ispod 45 °C zbog mogućeg razmnožavanja legionele [2].

6.1.8. Energija pomoćnog grijača

Energija pomoćnog grijača (kWh) kojim se dogrijava voda do zadane temperature ϑ_{set} računa se prema slijedećem izrazu

$$Q_{pom} = \dot{m}c_p(\vartheta_{set} - \vartheta_{s2}) \cdot t \tag{6.6}$$

U proračunu je za ϑ_{set} u zimskom periodu uzeta vrijednost 45 °C, a, u ljetnom periodu 50 °C. Vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta je uzeta iz toplinskih tablica $c_p = c_w = 4{,}3$ kW/(kgK) [4].

6.2. Rezultati satne simulacije

Rezultati satne simulacije sustava ($A_{kol} = 4$ m^2 , V_{sprem}=300 litara) za zimski i ljetni period su prikazani u tablicama 4. i 5. gdje su prikazane srednje vrijednosti temperature u solarnom spremniku na kraju svakog sata. Odabran je nazivni učin pomoćnog grijaća je 740 W koji se u simulaciji koristi za zagrijavanje spremnika u zimskom režimu rada solarnog sustava za pripremu PTV-a.

Tablica 4. Tablični prikaz rezultata satne simulacije za siječanj

Sat h	$\dot{m}$ kg/h	Q_{kol} Wh	Q_{PTV} Wh	ϑ_{s1} °C	$\Delta\vartheta$ °C	ϑ_{s2} °C	Q_{pom} Wh
4-5	0	0	0	18	0	18	0
5-6	0	0	0	18	0	18	0
6-7	5.14	0	18.0	18	-0.06	17.94	166.2
7-8	11.71	0	40.1	17.94	-0.13	17.82	380.3
8-9	17.71	0	58.1	17.82	-0.18	17.64	579.0
9-10	20.00	194.1	61.3	17.64	0.39	18.02	644.5
10-11	17.14	450.2	60.3	18.02	1.15	19.18	528.8
11-12	11.43	627.4	55.5	19.18	1.70	20.87	329.4
12-13	7.14	651.0	48.8	20.87	1.79	22.66	190.6
13-14	12.29	480.6	109.5	22.66	1.09	23.75	311.8
14-15	8.57	186.5	87.3	23.75	0.28	24.03	214.7
15-16	7.14	0	75.1	24.03	-0.24	23.80	180.9
16-17	5.71	0	58.5	23.80	-0.18	23.61	146.0
17-18	11.43	0	114.6	23.61	-0.36	23.25	296.9
18-19	17.71	0	170.2	23.25	-0.53	22.72	471.4
19-20	28.57	0	256.7	22.72	-0.81	21.91	787.9
20-21	24.29	0	195.4	21.91	-0.61	21.30	687.5
21-22	17.71	0	129.9	21.30	-0.41	20.89	510.1
22-23	14.86	0	121.5	20.89	-0.38	20.51	434.6
23-24	11.43	0	113.6	20.51	-0.36	20.15	339.2

Tablica 5. Tablični prikaz rezultata satne simulacije za srpanj

Sat h	$\dot{m}$ kg/h	Q_{kol} Wh	Q_{PTV} Wh	ϑ_{s1} °C	$\Delta\vartheta$ °C	ϑ_{s2} °C	Q_{pom} Wh
4-5	0	0	0	18	0	18	0
5-6	0	350.3	0	18	1.04	19.04	0
6-7	5.14	645.8	24.2	19.04	1.85	20.90	148.1
7-8	11.71	974.2	80.4	20.90	2.65	23.55	300.1
8-9	17.71	1317.1	176.3	23.55	3.38	26.92	382.5
9-10	20.00	1601.7	277.6	26.92	3.91	30.83	338.5
10-11	17.14	1794.0	315.9	30.83	4.36	35.19	200.9

11-12	11.43	1837.8	268.6	35.19	4.64	39.83	70.6
12-13	7.14	1767.6	206.4	39.83	4.62	44.45	4.7
13-14	12.29	1553.7	421.2	44.45	3.31	47.77	0
14-15	8.57	1238.1	326.9	47.77	2.67	50.43	0
15-16	7.14	852.0	294.6	50.43	1.62	52.05	0
16-17	5.71	485.0	246.4	52.05	0.67	52.72	0
17-18	11.43	79.9	501.8	52.72	-1.34	51.39	0
18-19	17.71	0	750.2	51.39	-2.36	49.03	0
19-20	28.57	0	1131.6	49.03	-3.55	45.48	0
20-21	24.29	0	861.4	45.48	-2.70	42.77	64.6
21-22	17.71	0	572.6	42.77	-1.80	40.97	85.2
22-23	14.86	0	535.5	40.97	-1.68	39.29	101.3
23-24	11.43	0	500.8	39.29	-1.57	37.72	99.4

7. RAČUNALNA SIMULACIJA

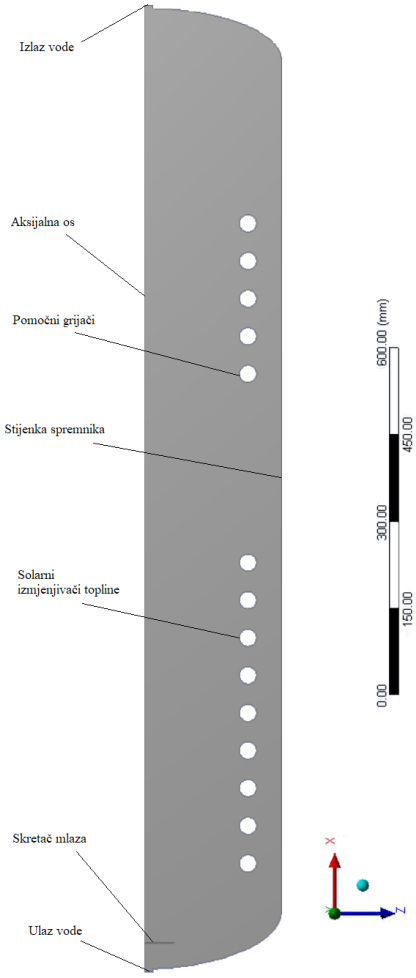
Prije računalnog rješavanja numeričkog modela simulacije solarnog spremnika bilo je potrebno uvesti neke pretpostavke i pojednostavljenja.

S obzirom da je u akademskoj verziji računalnog programa ANSYS Fluenta broj elemenata (ćelija) koji opisuju prostornu domenu ograničen na 512 000 što nije dovoljno da bi se napravio kvalitetni trodimenzionalni model. Odabran je dvodimenzijsko osno-simetrični model strujanja čime se unijelo određene greške u model zbog toga što su spiralni izmjenjivači iz stvarnog akumulacijskog spremnika modelirani sa prstenovima preko čijih se površina toplinskim tokom dovodi energija u spremnik.

Pretpostavljeno je da je spremnik jako dobro termički izoliran tako da je u numeričkom modelu zanemaren toplinski tok kroz stjenku spremnika. Iznos toplinskog toka koji ulazi u spremnik preko izmjenjivačkih površina u funkciji je temperature i brzine strujanja radne tvari u kolektorskom krugu, temperaturi potrošne vode u blizini izmjenjivača i koeficijentu prolaza topline. Kad bi se toplinski tok modelirao preko navedenih funkcija dovelo bi do izuzetne složenosti modela i znatno bi se produljilo vrijeme računanja. S ciljem skraćenja potrebnog vremena za računanje je izmjena topline modelirana konstantnim toplinski tokom kroz izmjenjivačku površinu. Ujedno jedino je takvim načinom modeliranja moguća direktna usporedba računalne simulacije i modela prema EN 15316-5:2017.

7.1. Geometrija spremnika

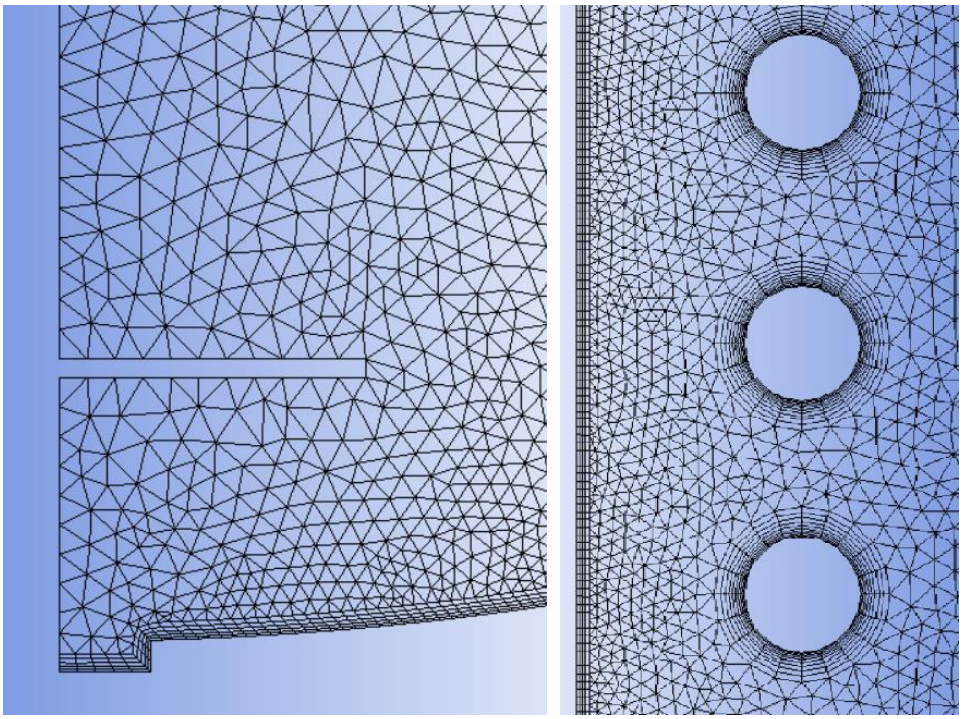
Kako nisu bile dostupne dimenzije odabranog Wolf SEM - 300 spremnika stoga se geometrija dimenzionirala preko približnih dimenzija sličnih Wolf-ovih spremnika iste zapremnine. Dvodimenzionalna geometrija spremnika je napravljena u alatu "DesignModeler" koji je dostupan u sklopu paketa ANSYS Fluent-a. Konačna zapremnina spremnika je manja od predviđenih 300 litara zbog dodanih izmjenjivača u geometriji i odstupanja od stvarnih dimenzija spremnika tako da zapremnina modeliranog spremnika iznosi 275 litara. U donjem dijelu spremnika kod ulaza svježe vode je modeliran skretač ulazne vode koji sprječava nagli prodor hladne vode u gornje toplije dijelove spremnika. Geometrija spremnika je prikazana na slici 7.



Slika 7. Dvodimenzionalna geometrija spremnika

7.2. Generiranje mreže

Nakon što je definirana geometrija spremnika potrebno je diskretizirati prostornu domenu. Kvaliteta generirane mreže bitno utječe na ispravnost dobivenih rezultata simulacijom. Loša mreža može uzrokovati nefizikalna rješenja ili se čak može dogoditi do urušavanja same simulacije. Mreža je generirana u programu "Meshing" koji je dostupan u sklopu Fluent-a. Domena je premrežena trokutima čime se dobila nestrukturna mreža. Oko izmjenjivača topline gdje se pojavljuju veliki temperaturni gradijenti su dodani četverokutni slojevi (inflation) s kojima se modelirao granični sloj. Također je modeliran granični sloj na ulazu hladne vode i izlazu tople vode iz spremnika te uz samu stjenku spremnika. Ukupan broj elemenata kojim je domena pokrivena je 45 258. Na slici 8. se vidi izgled mreže na ulazu u spremnik i oko izmjenjivača.



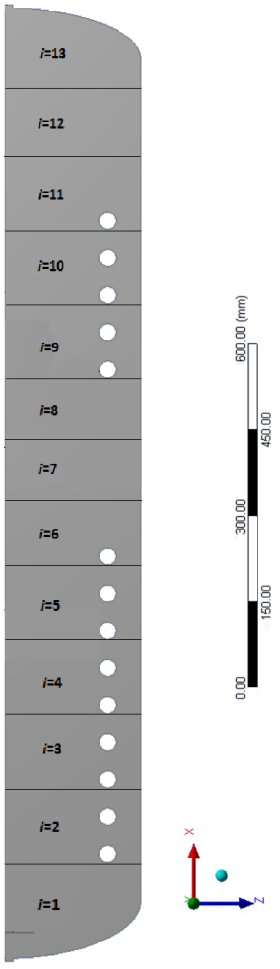
Slika 8. Izgled mreže u blizini ulaza u spremnik i oko izmjenjivaća

7.3. Rubni uvjeti

Osna simetrija kod dvodimenzionalno osno simetričnog strujanja je definirana funkcijom "Axis". Stjenke spremnika kroz koje nema toplinskih gubitaka su definirane funkcijom "Wall". Ulaz svježe vode u spremnik je definiran funkcijom velocity inlet, ali u periodu bez potrošnje PTV-a je definirana funkcijom "Wall" bez toplinskog toka. Izlaz iz spremnika je definiran funkcijom "Outflow" u periodu potrošnje PTV-a, dok u periodu bez potrošnje PTV-a je definiran funkcijom 'Wall". Donje izmjenjivačke površine solarnog kruga i gornje izmjenjivačke površine pomoćnog grijaća su definirane funkcijom "Wall" sa konstantnim toplinskim tokom.

8. PRORAČUN SPREMNIKA PREMA NORMI HRN EN 15316 – 5:2017

Proračun akumulacijskih toplovodnih spremnika provodi se prema normi HRN EN 15316-5:2017. Proračun se može provesti po metodi A koja uzima u obzir temperaturnu stratifikaciju po visini spremnika te po pojednostavljenoj metodi B u kojoj je homogena temperatura vode u cijelom spremniku. Za potrebe ovog rada korišten je aneks D koji je proširena verzija satne metode A prema kojoj je spremnik podijeljen na više segmenata jednakih volumena. U svakom segmentu je temperatura vode homogena. Na slici 9. je prikazana podjela geometrije spremnika na 13 segmenata.



Slika 9. Prikaz podjele spremnika na 13 segmenata jednakih volumena

Osnovna ideja metode A je energetski proračun pojedinog segmenta spremnika prema slijedećoj jednadžbi:

$$m_i \cdot c_\mathrm{p} \cdot \left(\vartheta_{\mathrm{t+1,i}} - \vartheta_{\mathrm{t,i}}\right) = Q_{\mathrm{t+1,i}} + \Delta m_\mathrm{t} \cdot c_\mathrm{p} \cdot \left(\vartheta_{\mathrm{t,i-1}} - \vartheta_{\mathrm{t,i}}\right) - Q_{\mathrm{sto,ls,i}} \qquad (8.1)$$

Lijevi član jednadžbe (8.1) predstavlja promjenu entalpije pojedinog segmenta unutar vremenskog intervala. Prvi član s desne strane jednadžbe je dovođenje ili odvođenje energije preko izmjenjivača, drugi član je promjena entalpije uslijed miješanja tvari sa susjednim segmentom, dok zadnji član predstavlja toplinske gubitke kroz stjenke spremnika koji su u ovome modelu zanemareni. Ovdje je potrebno reći da je normom potpuno zanemarena konduktivna izmjena topline između dva susjedna segmenta.

Iako je normom predviđeno da se proračunom prema metodi A provodi satna simulacija, za potrebe ovog rada je provedena minutna simulacija koja daje kvalitetnija rješenja. U aneksu D je navedeno da je metoda ograničena na sustave sa direktnom predajom topline iz spremnika PTV-a i da proračun ne obuhvaća istovremeno zagrijavanje PTV-a tijekom direktnog odvođenja topline iz spremnika.

Proračun provodi u 8 koraka:

1. U prvom koraku se provodi inicijalizacija gdje se definiraju temperature pojedinog segmenta spremnika
2. U drugom koraku se radi proračun volumena vode $V_{\mathrm{sto;use;W}}$ koji se isporučuje iz spremnika za potrebe PTV-a. Proračun se vodi prema traženoj energiji PTV-a koju je potrebno isporučiti, ali za ovaj model je volumen isporučene vode definiran potrošnjom PTV-a tijekom 8 minuta tuširanja.
3. U trećem koraku se radi proračun temperature spremnika nakon isporučene tople vode. Normom je zamišljeno da se voda u spremniku nakon isporuke PTV-a pomiče za volumen isporučene vode $V_{\mathrm{sto;use;W}}$ nakon ćega se u zamišljenim segmentima spremnika odvija adijabatsko miješanje tvari. Temperatura pojedinog segmenta *i* se računa prema slijedećoj jednadžbi

$$\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}} = \frac{\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i-1}} \cdot V_{\mathrm{sto;use;W}} + \vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}} \cdot (V_{\mathrm{sto;vol;i}} - V_{\mathrm{sto;use;W}})}{V_{\mathrm{sto;vol;i}}} \qquad (8.2)$$

   pri tome se za prvi segment *i*=1 gdje se nalazi ulaz sviježe vode u spremnik uzima da je temperatura nižeg segmenta $\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i-1}}$ jednaka temperaturi ulazne sviježe vode.

Koraci 4. i 5. se odnose na proračun prilikom isporuke vode iz spremnika za potrebe grijanja koje nije predviđeno u odabranom modelu spremnika.

6. U šestom koraku se računa izmjena topline izmjenjivačima. Nakon što se u pojedinom segmentu izmjeni toplina između radne tvari solarnog kruga i potrošne vode dolazi do povećanja temperature segmenta koja iznosi

$$\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}} = \vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}} + \frac{Q_{\mathrm{sto;in;i}}}{\rho_{\mathrm{w}} \cdot c_{\mathrm{w}} \cdot V_{\mathrm{sto;vol;i}}} \tag{8.3}$$

7. Prirodna temperaturna stratifikacija. Dovođenjem topline u pojedine segmente može se dogoditi da je temperatura vode nižeg segmenta veća od temperature gornjeg segmenta. Takvo stanje je nestabilno pa se zbog djelovanja uzgonskih sila ta dva sloja adijabatski izmiješaju tako da poprime jednaku temperaturu koja iznosi

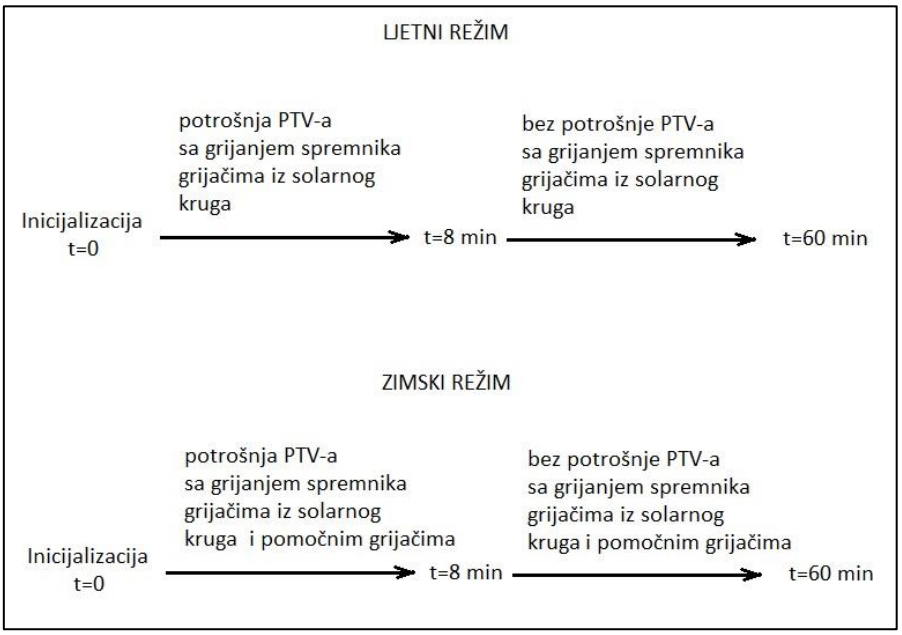
$$\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}} = \vartheta_{\mathrm{sto;vol;i+1}} = \frac{\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}} \cdot V_{\mathrm{sto;vol;i}} + \vartheta_{\mathrm{sto;vol;i+1}} \cdot V_{\mathrm{sto;vol;i+1}}}{V_{\mathrm{sto;vol;i}} + V_{\mathrm{sto;vol;i+1}}} \tag{8.4}$$

   Proračun se vodi iterativno sve dok se ne postigne stabilna temperaturna stratifikacija po visini spremnika.

U koraku 8. se proračunavaju toplinski gubici kroz stjenke spremnika koji su zanemareni u ovom modelu.

9. REZULTATI SIMULACIJE

Računalna simulacija numeričkog modela je provedena za zimski i ljetni režim rada solarnog spremnika u periodu od 13 do 14 sati te uključuje razdoblje sa potrošnjom PTV-a i bez potrošnje PTV-a. Na slici 10. je shematski prikazana vremenska traka tijeka simulacije.



Slika 10. Shematski prikaz vremenske trake računalne simulacije

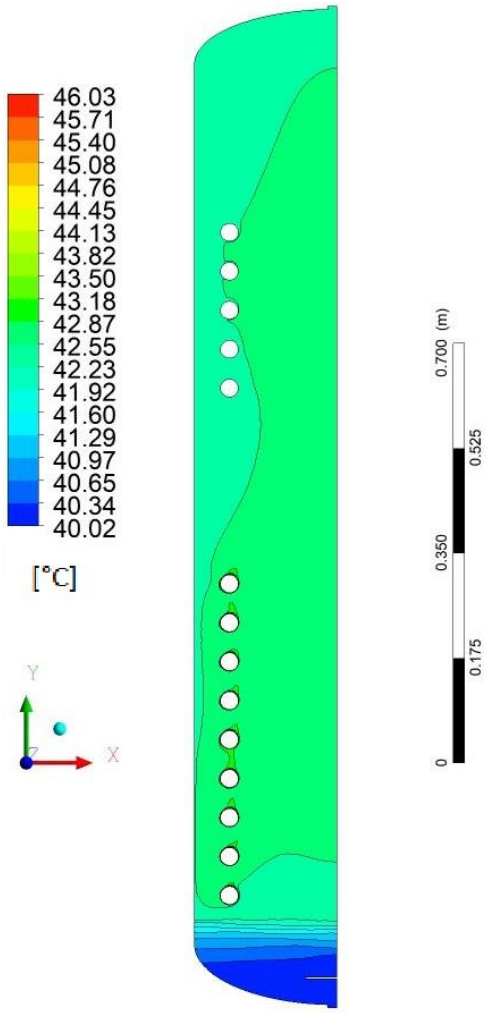
Kako bi rezultati bili realniji provela se simulacija inicijalizacije kojom se izbjeglo da u početnom trenutku (t=0) bude homogena temperatura vode u spremniku. Rezultati temperaturnog polja dobivenih računalnom simulacijom u programu ANSYS Fluentu su uspoređeni sa rezultatima dobivenim sa proračunom prema normi HRN EN 15316-5:2017. U stupčanim dijagramima su uspoređene srednje temperature po segmentima na koje je spremnik podijeljen radi proračuna prema normi.

9.1. Ljetni režim rada spremnika

Za ljetni režim rada u modelu solarnog spremnika je bio uključen grijač iz solarnog kruga. Izmjenjivač je smješten u donjem dijelu spremnika gdje radna tvar iz kolektora predavala 1625 W toplinskog toka vodi u spremniku.

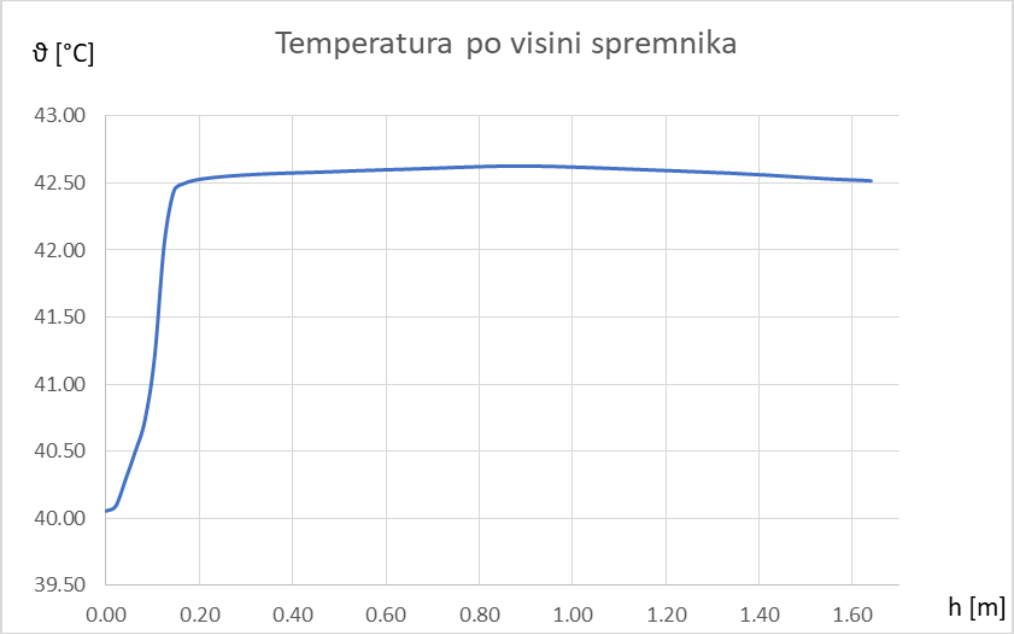
9.1.1. Inicijalizacija (t=0 min)

Inicijalizacija za ljetni režim rada se provela tako da se voda u solarnom spremnik početne temperature 40 °C zagrijavala 30 minuta solarnim grijačem. Dobiveni rezultati temperaturnog polja su prikazani na slici 11. gdje je uočljivo da se voda u dijelu spremnika koji se nalazi ispod solarnih izmjenjivača topline nije znatnije zagrijala u odnosu na gornje dijelove spremnika. Rezultati inicijalizacije su korišteni kao početni uvjeti za daljnju dinamičku simulaciju.



Slika 11. Temperaturno polje u spremniku dobiveno inicijalizacijom uz ljetnom režimu rada solarnog spremnika

Na slici 12. se može vidjeti raspodjela temperature po visini spremnika od ulaza svježe vode u spremnik (h=0 m) do izlaza potrošne tople vode (h= 1.66 m). Uočljiv je veliki temperaturni gradijent od h=0 m do h=0.15 m odnosno u području ispod izmjenjivača.



Slika 12. Temperatura vode po visini spremnika nakon inicijalizacije za ljetni režim rada solarnog spremnika

U tablici 6. su dane vrijednosti temperature u spremniku na pojedinoj visini.

Tablica 6 Tablični prikaz inicijalne temperatura vode na pojedinim visinama u ljetnom režimu rada solarnog spremnika

h [mm]	ϑ [°C]
0	40.05
100	41.15
200	42.53
300	42.56
400	42.58
500	42.59
600	42.60
700	42.61
800	42.62
900	42.63

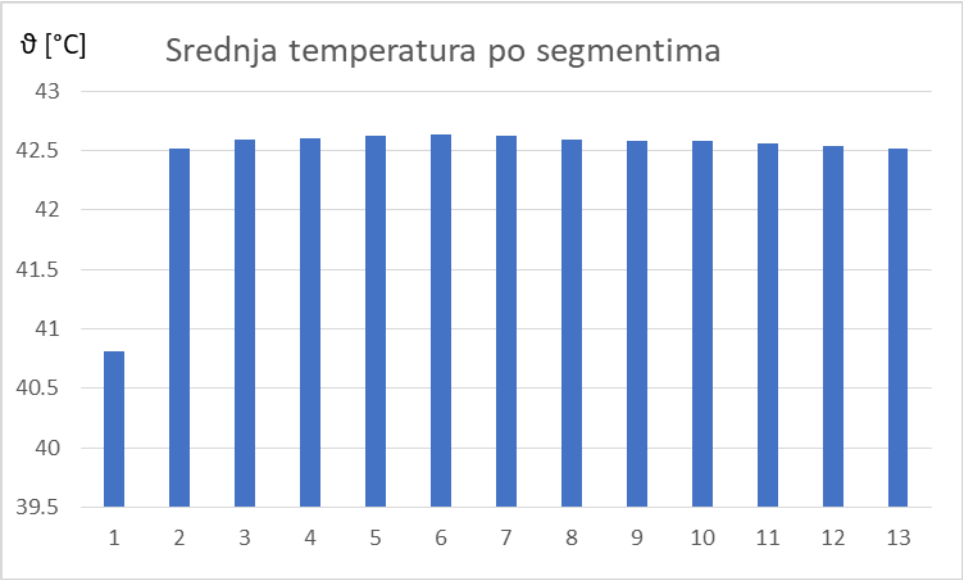
1000	42.62
1100	42.60
1200	42.59
1300	42.57
1400	42.56
1500	42.53
1600	42.52

U tablici 7. i na stupčanom dijagramu sa slike 13. su dane osrednjene vrijednosti temperature vode u zamišljenim segmentima spremnika gdje je uočljivo da su temperature u spremniku poprilično ujednačene osim u prvom, najnižem segmentu u kojem se ne nalaze izmjenjivačke površine.

Tablica 7. Tablični prikaz osrednjenih inicijalnih temperatura vode po segmentima spremnika u ljetnom režimu rada

i	$\vartheta_{sr;i}$ [°C]
1	40.81
2	42.52
3	42.59
4	42.60
5	42.62
6	42.63
7	42.62
8	42.59
9	42.58
10	42.58
11	42.56
12	42.54
13	42.52

Vrijednosti osrednjene temperature vode po segmentima su korištene za početno stanje kod proračuna spremnika prema normi.



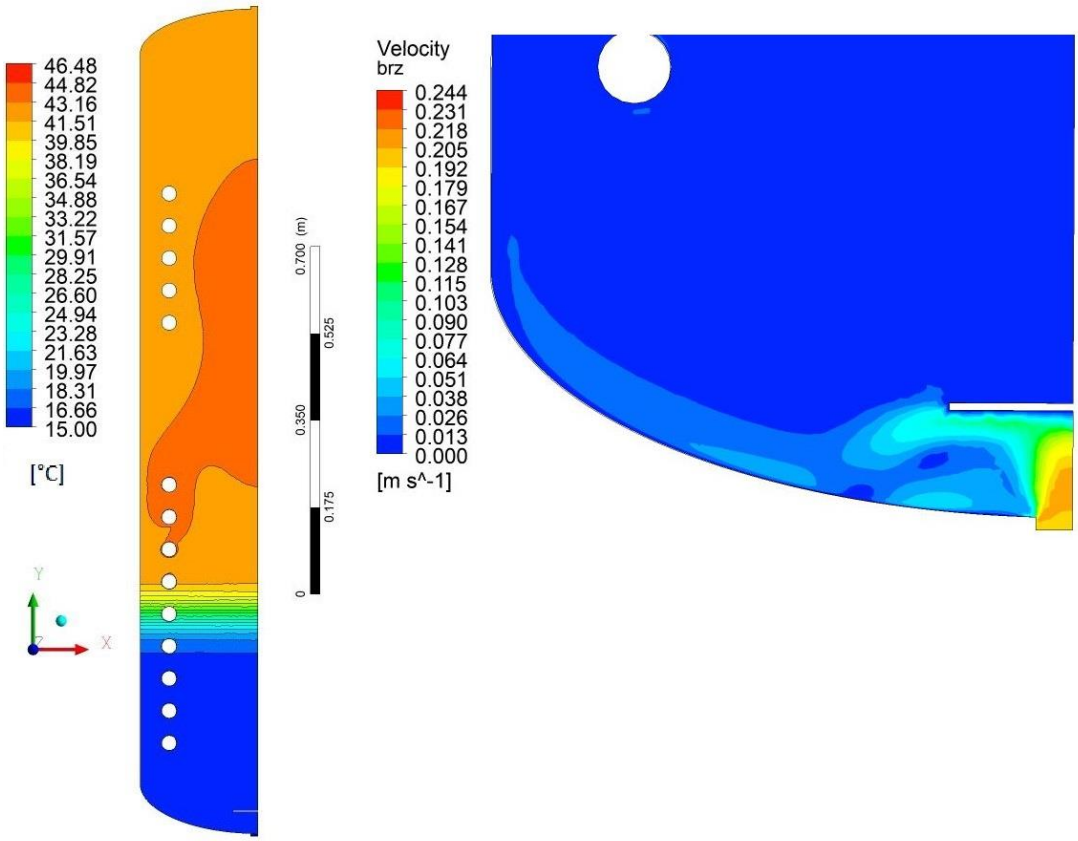
Slika 13. Dijagram uprosječene inicijalne temperature po segmentima spremnika u ljetnom režimu rada koje su dobivene računalnom simulacijom

9.1.2. Period sa potrošnjom PTV-a (od t=0 min do t=8 min)

Rezultati inicijalizacije su uzeti za početni uvjeti simulacije potrošnje PTV-a. Ulaz hladne vode u donjem dijelu spremnika uvjetovan je potrošnjom PTV-a koja za prosječno tuširanje u kućanstvu iznosi 9 litara u minuti. Toj količini vode odgovara ulaz svježe vode u spremnik sa brzinom od 0.2 m/s. Temperatura ulazne vode u spremnik je 15 °C.

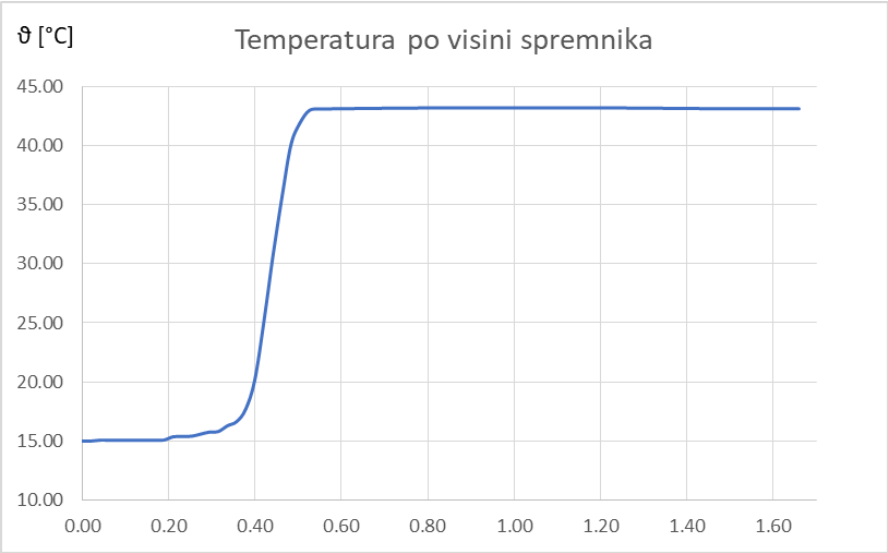
Na slici 14. se vidi temperaturno polje u spremniku nakon 8 minuta potrošnje PTV-a gdje se vidi velika temperaturna stratifikacija oko središnjih izmjenjivačkih površina solarnog kruga uzrokovanih ulaskom hladne vode.

Na slici je također vidljiv efekt podizanja vode gdje nije došlo do velikog miješanja tople vode i ulazne hladne vode što je i poželjno. Na slici je prikazano i polje brzina strujanja u blizini ulaza u spremnik gdje se vidi utjecaj skretača mlaza vode na prodor u gornje slojeve.



Slika 14. Temperaturno polje i polje brzina strujanja u spremniku nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada solarnog spremnika

U dijagramu na slici 15. je prikazana temperatura potrošne vode u funkciji visine spremnika gdje je uočljiva velika temperaturna stratifikacija između h=0.3 m i h=0.5 m. Uspoređujući sa dijagramom inicijalnog stanja vidljivo je da se područje u kojem je izrazita temperaturna stratifikacija pomaknulo prema gore.



Slika 15. Temperatura vode po visini spremnika nakon potrošnje PTV-a

U tablici 8 su dane vrijednosti temperature vode u spremniku za pojedine visine spremnika.

Tablica 8. Tablični prikaz temperatura vode na pojedinim visinama spremnika

h [mm]	ϑ [°C]
0	15.00
100	15.06
200	15.29
300	15.79
400	23.44
500	42.83
600	43.14
700	43.17
800	43.20
900	43.21
1000	43.21
1100	43.20
1200	43.19
1300	43.17
1400	43.14
1500	43.12

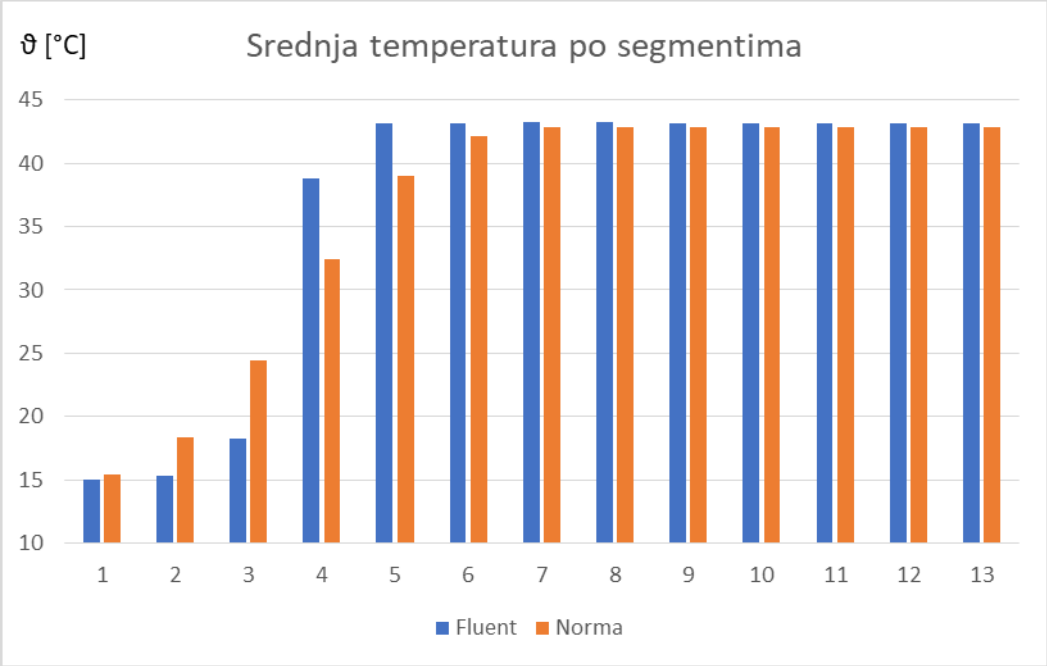
1600	43.12

U tablici 9. je prikazana usporedba osrednjenih vrijednosti temperature vode po zamišljenim segmentima dobivenih računalnom simulacijom $\vartheta_{sr;i}$ i vrijednosti izračunatih prema normi $\vartheta_{\text{sto;vol;i}}$.

Tablica 9. Tablični prikaz srednje temperature vode po segmentima spremnika izračunatih računalnom simulacijom i prema normi nakon potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada

i	$\vartheta_{sr;i}$ [°C]	$\vartheta_{\text{sto;vol;i}}$ [°C]	$\vartheta_{sr;i}$ - $\vartheta_{\text{sto;vol;i}}$
1	15.04	15.43	0.00
2	15.34	18.36	-1.82
3	18.30	24.45	-2.50
4	38.84	32.38	3.06
5	43.13	38.97	1.39
6	43.18	42.17	1.41
7	43.2	42.79	1.42
8	43.2	42.83	1.94
9	43.19	42.85	-0.21
10	43.18	42.85	-0.16
11	43.16	42.85	-0.14
12	43.13	42.85	-0.13
13	43.12	42.85	-0.13

Isti rezultati su prikazani i u dijagramu na slici 16. u kojem se vidi da vrijednosti temperature izračunate prema normi znatnije odstupaju od uprosječene temperature dobivene računalnom simulacijom u segmentima 2, 3, 4 i 5 u kojima se i nalaze izmjenjivači solarnog kruga. Primjećuje se blaži porast temperature tih dijelova u odnosu na rezultate računalne simulacije.

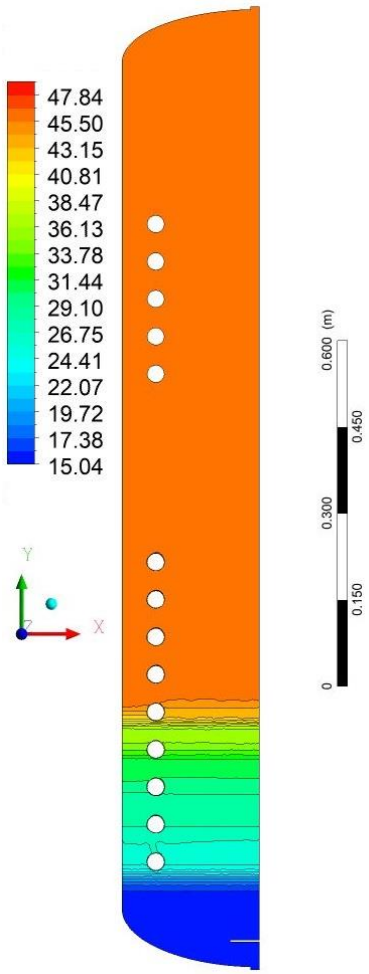


Slika 16. Usporedba temperature vode po segmentima dobivenih računalnom simulacijom i izračunatih prema normi

9.1.3. Period bez potrošnje PTV-a (od t=8 min do t= 60 min)

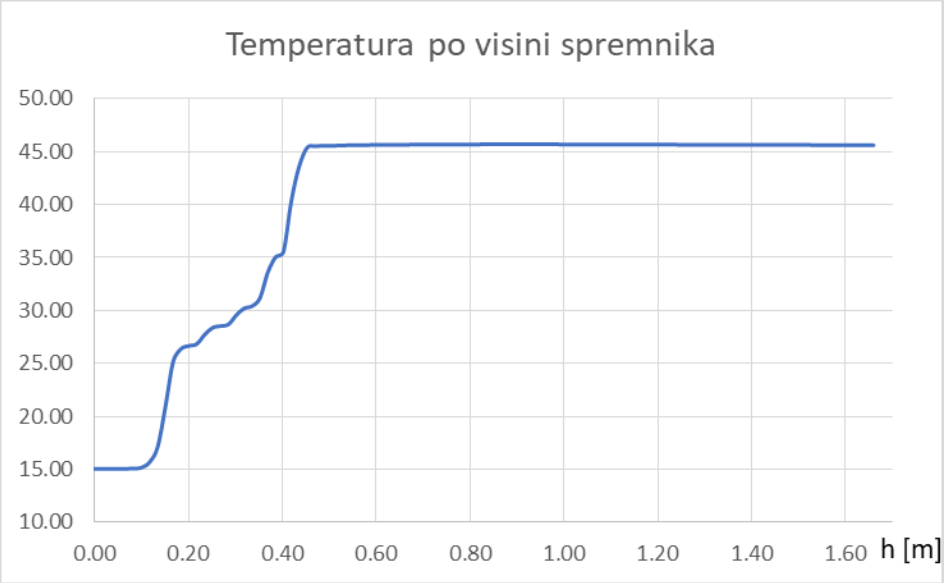
Rezultati prethodne simulacija potrošnje PTV-a su uzeti za početne uvjete simulacije grijanja spremnika solarnim grijačima bez potrošnje PTV-a u trajanju od 52 minute.

Rezultati temperaturnog polja dobivenih računalnom simulacijom su prikazani na slici 17. gdje je uočljiv veći temperaturni gradijent po visini spremnika od h=0.1 m do h =0.45 m, dok je temperatura vode iznad tog dijela gotovo ujednačena.



Slika 17. Temperaturno polje u spremniku nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada

U dijagramu na slici 18. je prikazana temperature vode po visini spremnika gdje je uočljiva izrazita temperaturna stratifikacija od h=0.12 m do h=0.45 m. U tablici 10. su dane vrijednosti temperature za pojedine visine spremnika.



Slika 18. Temperature vode po visini spremnika nakon 52 minute zagrijavanja bez potrošnje PTV-a za ljetni režim rada

U tablici 10. su dane vrijednosti temperature vode u spremniku na pojedinim visinama spremnika.

Tablica 10. Tablični prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada

h [mm]	ϑ [°C]
0	15.04
100	15.23
200	26.70
300	30.01
400	38.10
500	45.58
600	45.65
700	45.68
800	45.70
900	45.70
1000	45.69
1100	45.68
1200	45.66

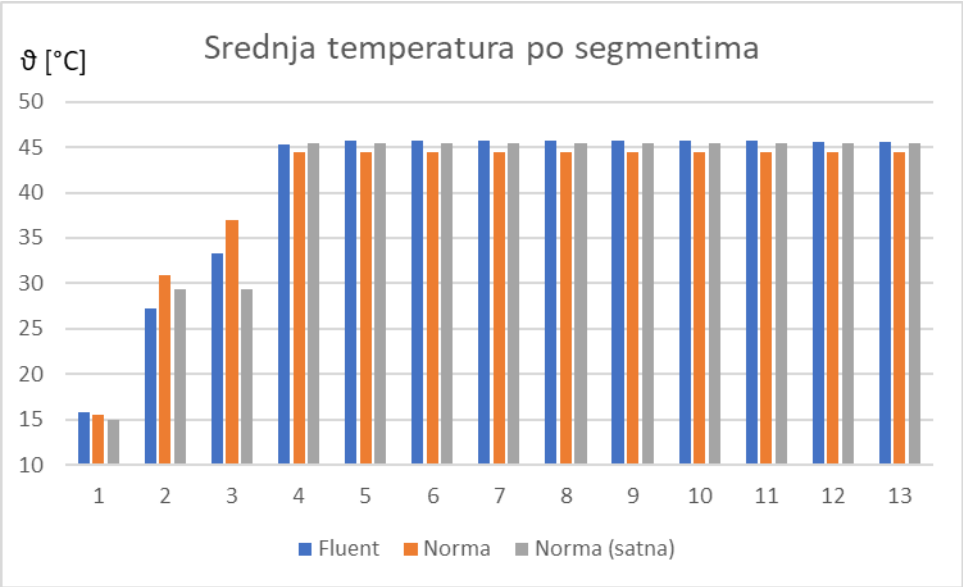
1300	45.65
1400	45.64
1500	45.63
1600	43.12

U Tablici 11. su uspoređene vrijednosti osrednjene temperature po segmentima dobivene računalnom simulacijom i vrijednosti temperature izračunate prema normi (minutna i satna simulacija).

Tablica 11. Tablični prikaz temperature vode nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a po segmentima spremnika izračunatih računalnom simulacijom i prema normi

i	$\vartheta_{sr;i}$ [°C]	$\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}}$ [°C]	$\vartheta_{sr;i}$ - $\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}}$	$\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}}$ (satna)	$\vartheta_{sr;i}$ - $\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}}$(satna)
1	15.78	15.43	0.35	15.00	0.78
2	27.21	30.85	-3.64	29.41	-2.20
3	33.32	36.93	-3.61	29.41	3.91
4	45.27	44.46	0.81	45.46	-0.19
5	45.65	44.46	1.19	45.46	0.19
6	45.69	44.46	1.23	45.46	0.23
7	45.7	44.46	1.24	45.46	0.24
8	45.68	44.46	1.22	45.46	0.22
9	45.67	44.46	1.21	45.46	0.21
10	45.66	44.46	1.20	45.46	0.20
11	45.65	44.46	1.19	45.46	0.19
12	45.64	44.46	1.18	45.46	0.18
13	45.63	44.46	1.17	45.46	0.17

Isti rezultati su prikazani u dijagramu na slici 19. Najmanje odstupanje dobivenih vrijednosti su u prvom segmentu, dok su najveća odstupanja u drugom i trećem segmentu. Od petog pa sve do zadnjeg segmenta vrijednosti izračunate prema normi su približno 1.2 °C manje od onih vrijednosti koje su dobivene simulacijom. Isto tako je zanimljivo da su manja odstupanja rezultata dobivenih računalnom simulacijom u slučaju kada se vodila satna simulacija proračuna prema normi.



Slika 19. Usporedba srednje temperature vode po segmentima dobivenih računalnom simulacijom i izračunatih prema normi nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u ljetnom režimu rada

9.2. Zimski režim rada solarnog spremnika

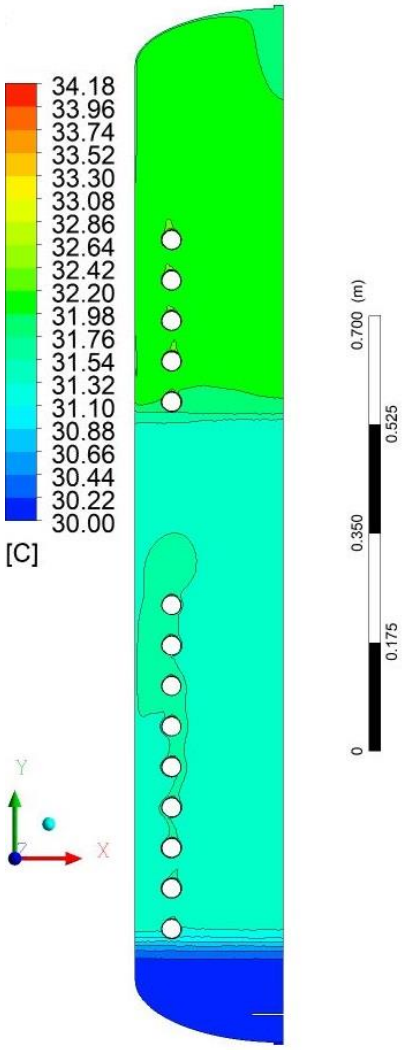
Kod zimskog režim rada u modelu solarnog spremnika su bili uključeni i solarni i pomoćni grijači . Solarni izmjenjivač koji se nalazi u donjem dijelu spremnika daje 478 W dok grijači pomoćnog kruga daju 740 W toplinskog toka.

9.2.1. Inicijalizacija (t = 0 min)

Inicijalizacija za ljetni režim rada se provela tako da se voda u solarnom spremnik početne temperature 30 °C zagrijavala 30 minuta solarnim i pomoćnim grijačima.

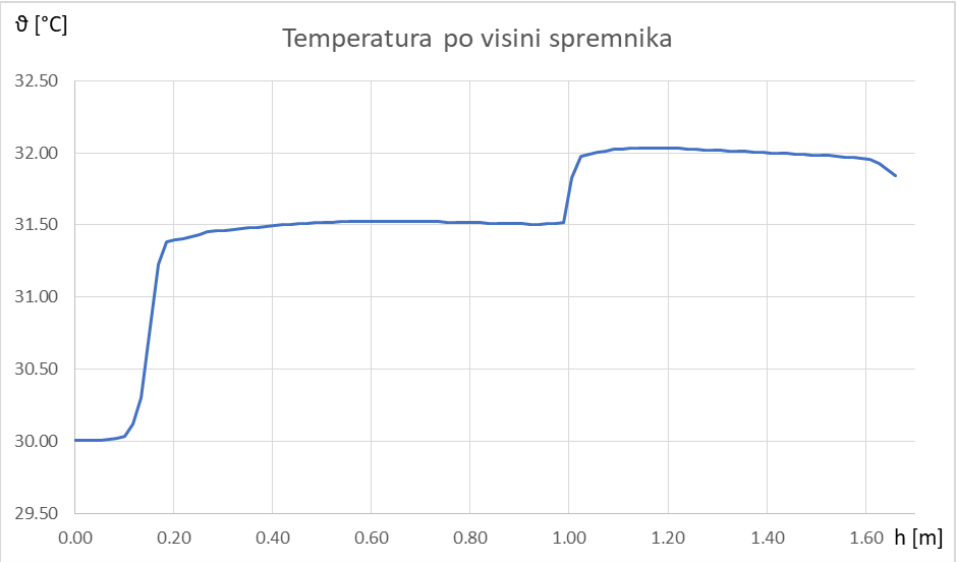
Dobiveni rezultati temperaturnog polja su prikazani na slici 20. gdje je uočljivo da se voda u dijelu spremnika ispod solarnih izmjenjivača topline nije znatnije zagrijala u odnosu na gornje dijelove spremnika. Isto tako je uočljivo da je voda u spremniku progrijanija od donje izmjenjivačke površine pomoćnog grijaća prema vrhu spremnika.

Rezultati inicijalizacije su korišteni kao početni uvjeti za daljnju dinamičku simulaciju perioda bez potrošnje PTV-a.



Slika 20. Temperaturno polje u spremniku dobiveno inicijalizacijom za zimski režim rada solarnog spremnika.

U dijagramu na slici 21. je prikazana temperatura vode po visini spremnika gdje možemo vidjeti 2 uska područja temperaturnih gradijenata. Prvo područje se nalazi ispod najniže izmjenjivačke površine solarnog kruga, a drugo područje ispod najniže izmjenjivačke površine pomoćnog grijaća. Unatoč postojanju tih temperaturnih gradijenata nije prisutna značajnija temperaturna stratifikacija u spremnika.



Slika 21. Temperatura vode po visini spremnika nakon inicijalizacije za zimski režim rada solarnog spremnika

U tablici 12. su dane vrijednosti temperature vode na pojedinim visinama spremnika nakon inicijalizacije.

Tablica 12. Tablični prikaz inicijalne temperatura vode po visini spremnika u zimskom režimu rada solarnog spremnika

h [mm]	ϑ [°C]
0	30.00
100	30.04
200	31.40
300	31.47
400	31.50
500	31.52
600	31.53
700	31.52
800	31.51
900	31.51
1000	31.99
1100	32.03
1200	32.03

1300	32.01
1400	31.99
1500	31.97
1600	31.84

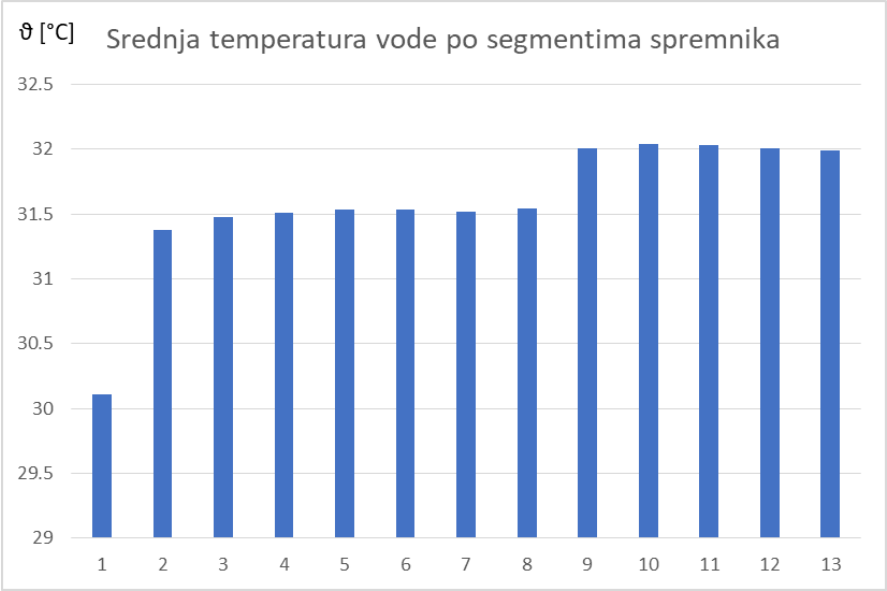
U tablici 13. su dane osrednjene vrijednosti temperature po segmentima spremnika izračunate računalnom simulacijom. Te vrijednosti su uzete za inicijalno stanje kod proračuna spremnika prema normi.

Tablica 13. Tablični prikaz osrednjenih inicijalne temperature vode po segmentima spremnika za zimski režim rada solarnog spremnika

i	ϑsr [°C]
1	30.11
2	31.38
3	31.48
4	31.51
5	31.53
6	31.53
7	31.52
8	31.54
9	32.01
10	32.04
11	32.03
12	32.01
13	31.99

Isti rezultati su prikazani u dijagramu na slici 22. gdje se uočavaju 3 temperaturna područja. Prvo područje čini prvi i najniži segment temperature 30.11 °C. Drugo područje čine segmenti 2, 3, 4, 5, 6, 7 i 8 koji imaju temperaturu oko 31.5 °C. Zanimljivo je to da to temperaturno područje obuhvaća segmente od najnižeg segmenta u kojem se nalazi grijač solarnog kruga do segmenta koji se nalazi ispod najnižeg segmenta u kojem se nalazi pomoćni grijač. Treće temperaturno područje čine segmenti 9, 10, 11, 12 i 13 odnosno segmenti od najnižeg

segmenta u kojem se nalazi pomoćni grijač pa sve do vrha spremnika. Vrijednost temperature u trećem temperaturnom području se kreće oko 32 °C.

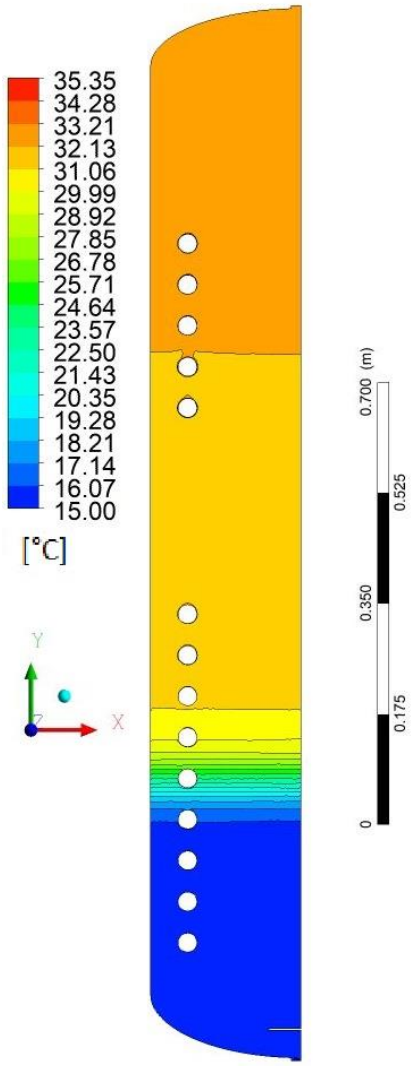


Slika 22. Dijagram uprosječene inicijalne temperature po segmentima spremnika u zimskom režimu rada koje su dobivene računalnom simulacijom

9.2.2. Period sa potrošnjom PTV-a (od t=0 min do t=8 min)

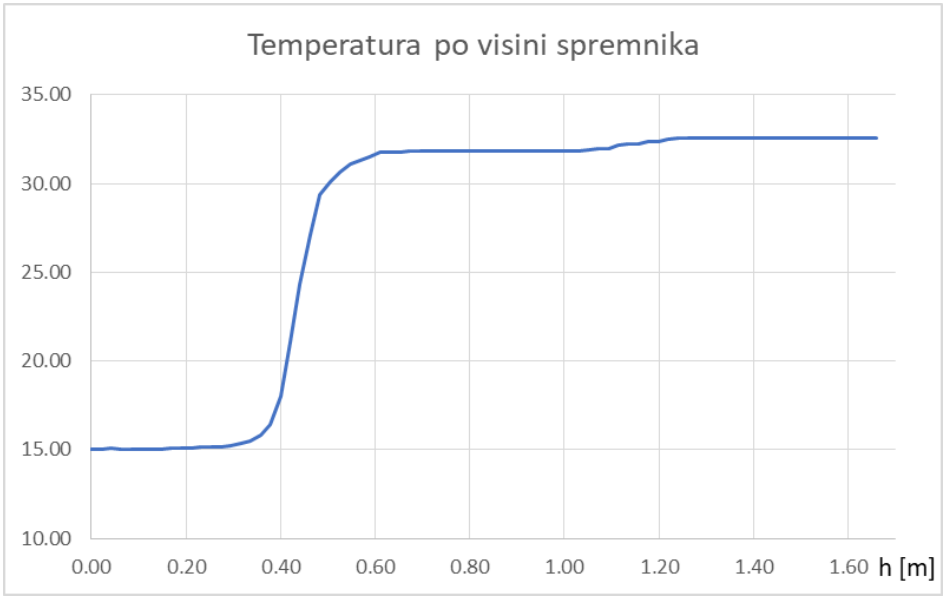
Rezultati inicijalizacije za zimski režim rada su uzeti za početne uvjete simulacije potrošnje PTV-a. I u zimskom režimu rada solarnog spremnika uzeta je ista potrošnja PTV-a kao i u ljetnom režimu u iznosu od 9 litara u minuti. Toj količini vode odgovara ulaz svježe vode u spremnik sa brzinom od 0.2 m/s. Temperatura ulazne vode u spremnik je 15 °C.

Na slici 23. se vidi temperaturno polje u spremniku nakon 8 minuta potrošnje PTV-a gdje se uočava veliki temperaturni gradijent po visini spremnika u području središnjih izmjenjivačkih površina solarnog kruga. Isto tako se vidi temperaturni gradijent po visini spremnika oko pomoćnog izmjenjivača ali je on znatno nižeg iznosa.



Slika 23. Prikaz temperaturnog polja u spremnika nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada

U dijagramu na slici 24. je prikazana temperature vode po visini spremnika. Na dijagramu se vidi da od visine h=0.3 m pa do h=0.6 m raste temperatura vode u spremniku od 15.35 °C do 31.79 °C. Taj veliki temperaturni gradijent je posljedica ulaska hladne vode u spremnik prilikom potrošnje PTV-a koja se djelomično izmiješala sa toplom vodom iz spremnik. U dijagramu se također vidi blagi porast temperature u oko središnjih izmjenjivačkih površina pomoćnog grijača. Uspoređujući sa inicijalnim stanjem vidi se da su se temperaturni gradijenti tijekom potrošnje PTV-a pomakli prema gore.



Slika 24. Dijagramski prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada

U tablici 14. su dane vrijednosti temperature vode na pojedinim visinama spremnika nakon osam minuta potrošnje PTV-a.

Tablica 14. Tablični prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada

h [mm]	ϑ [°C]
0	15.00
100	15.06
200	15.07
300	15.35
400	20.09
500	30.56
600	31.79
700	31.81
800	31.81
900	31.81
1000	31.82
1100	32.22
1200	32.55

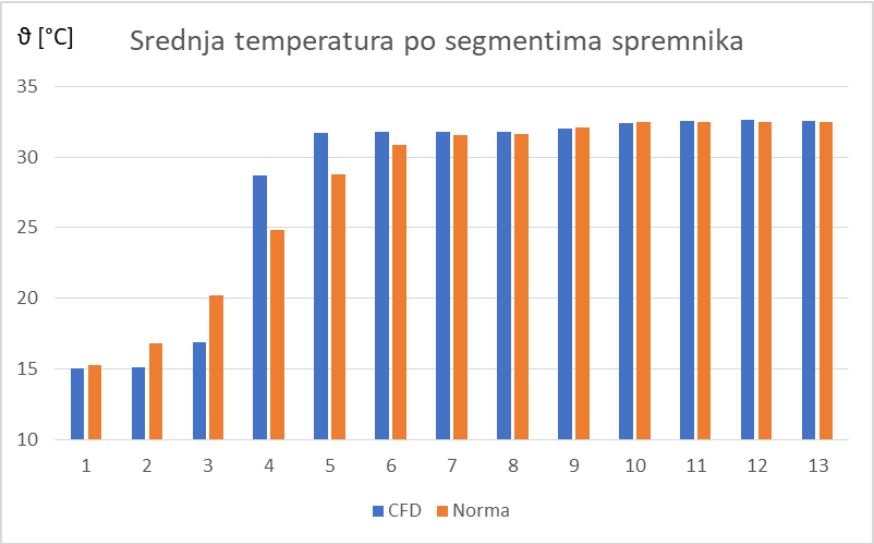
1300	32.58
1400	32.59
1500	32.59
1600	32.58

U tablici 15. su uspoređene osrednjene vrijednosti temperature vode po segmentima spremnika dobivene računalnom simulacijom numeričkog modela i vrijednosti temperature izračunate prema normi.

Tablica 15. Tablični prikaz vrijednosti temperature vode po segmentima nakon 8 minuta potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada spremnika izračunatih računalnom simulacijom i prema normi

i	$\vartheta_{sr;i}$ [°C]	$\vartheta_{sto;vol;i}$ [°C]	$\vartheta_{sr;i}$ - $\vartheta_{sto;vol;i}$
1	15.04	15.25	-0.21
2	15.13	16.79	-1.66
3	16.85	20.20	-3.35
4	28.69	24.80	3.89
5	31.69	28.76	2.93
6	31.81	30.88	0.93
7	31.82	31.54	0.28
8	31.82	31.64	0.18
9	32.01	32.13	-0.12
10	32.43	32.47	-0.04
11	32.58	32.47	0.11
12	32.6	32.47	0.13
13	32.59	32.47	0.12

Isti rezultati su prikazani u dijagramu na slici 25. gdje se uočavaju osjetnija odstupanja dobivenih rezultata u segmentima 2, 3, 4, 5, 6 koji obuhvaćaju izmjenjivačke površine solarnog kruga. U segmentima iznad izmjenjivača solarnog kruga dobivene vrijednosti temperature odstupaju maksimalno 0.28 °C. Također se u tim segmentima uočava nagliji porast temperature po segmentima u računalnoj simulaciji, dok je prema vrijednostima izračunatim prema normi taj prijelaz nešto blaži.

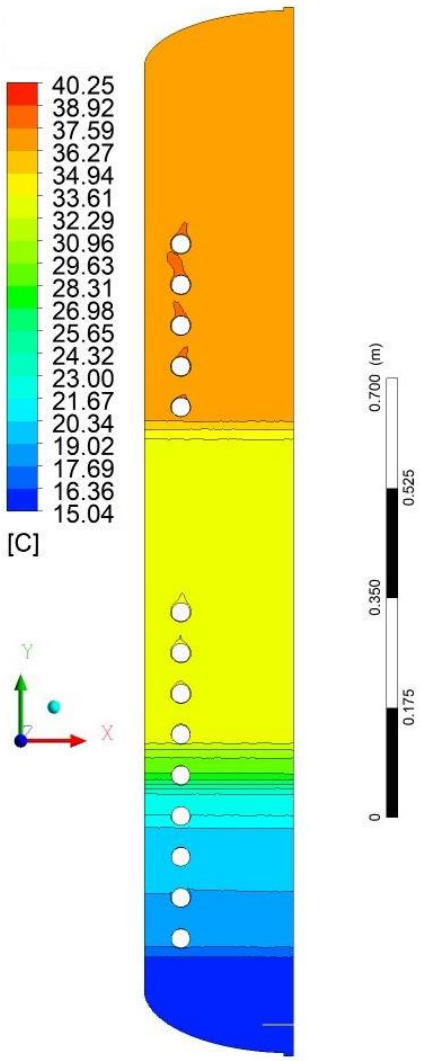


Slika 25. Usporedba srednje temperature vode po segmentima dobivene računalnom simulacijom i izračunatih prema normi nakon 8 minute potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada

9.2.3. Period bez potrošnje PTV-a (od t=8 min do t= 60 min)

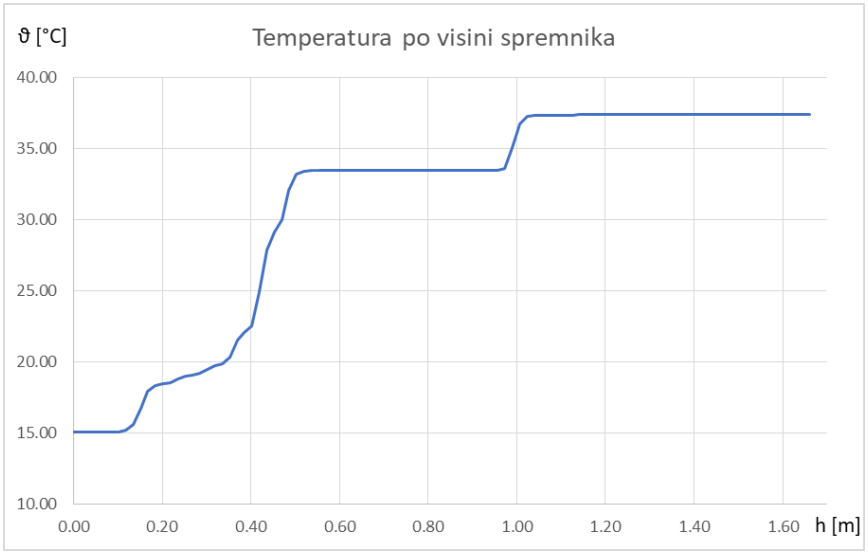
Rezultati prethodne simulacije potrošnje PTV-a su uzeti za inicijalne podatke u simulaciji zagrijavanja spremnika solarnim i pomoćnim grijačima 52 minute bez potrošnje PTV-a.

Na slici 26. je prikazano temperaturno polje u spremniku koje je dobiveno nakon 52 minute zagrijavanja vode u spremniku. U donjem dijelu spremnika je uočljiva temperaturna stratifikacija. Također je uočljiv temperaturni gradijent ispod zadnje izmjenjivačke površine pomoćnog grijaća. Područje ispod izmjenjivača solarnog kruga se nije znatnije progrijao što je posljedica uzgonskog djelovanja toplijih čestica vode.



Slika 26. Temperaturno polje u spremniku nakon 52 minute zagrijavanja solarnim i pomoćnim grijaćima bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada

U dijagramu na slici 27. su prikazane vrijednosti temperature po visini spremnika. Uočava se veliki temperaturni gradijent u području od h=0.12 m do h=0.45m gdje temperatura raste od 15 °C do 33.5 °C.



Slika 27. Dijagramski prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada

U tablici 16. su dane vrijednosti temperature vode u spremniku na pojedinim visinama.

Tablica 16. Tablični prikaz temperature vode po visini spremnika nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada

h [mm]	ϑ [°C]
0	15.04
100	15.10
200	18.46
300	19.66
400	24.11
500	33.37
600	33.48
700	33.49
800	33.49
900	33.49
1000	37.33
1100	37.37
1200	37.39
1300	37.40
1400	37.41

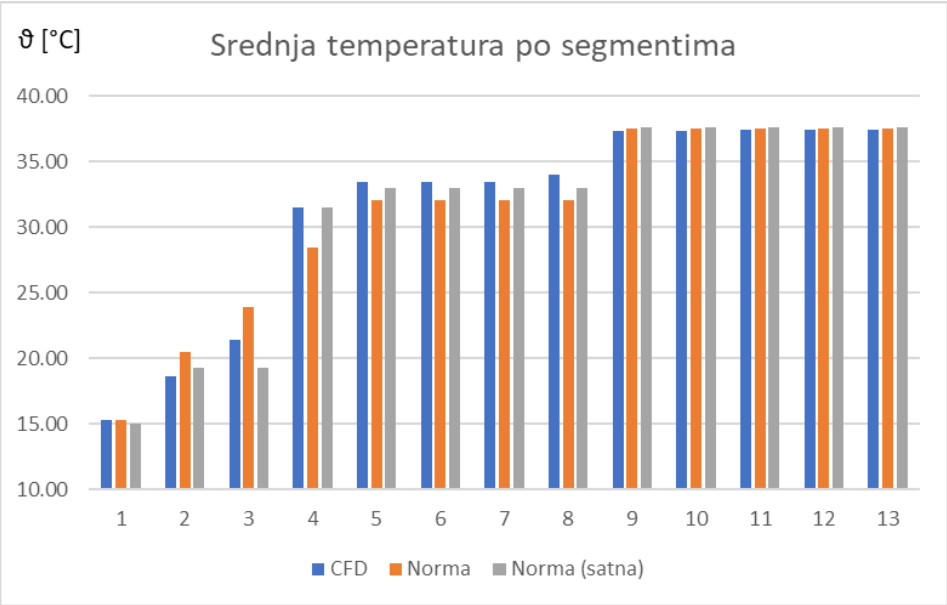
1500	37.42
1600	37.38

U tablici 17. su uspoređene temperature vode po segmentima koje su dobivene računalnom simulacijom i proračunom prema normi.

Tablica 17. Tablični prikaz vrijednosti temperature vode po segmentima nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada spremnika izračunatih računalnom simulacijom i prema normi

i	$\vartheta_{sr;i}$ [°C]	$\vartheta_{sto;vol;i}$ [°C]	$\vartheta_{sr;i}$ - $\vartheta_{sto;vol;i}$	$\vartheta_{sto;vol;i}$ (satna)	$\vartheta_{sr;i}$ - $\vartheta_{sto;vol;i}$(satna)
1	15.25	15.25	0.00	15.00	0.25
2	18.64	20.46	-1.82	19.24	-0.60
3	21.37	23.87	-2.50	19.24	2.13
4	31.53	28.47	3.06	31.50	0.03
5	33.47	32.08	1.39	32.99	0.48
6	33.49	32.08	1.41	32.99	0.50
7	33.50	32.08	1.42	32.99	0.51
8	34.02	32.08	1.94	32.99	1.03
9	37.34	37.55	-0.21	37.64	-0.30
10	37.39	37.55	-0.16	37.64	-0.25
11	37.41	37.55	-0.14	37.64	-0.23
12	37.42	37.55	-0.13	37.64	-0.22
13	37.42	37.55	-0.13	37.64	-0.22

Isti rezultati su prikazani u dijagramu na slici 28. gdje je vidljivo da su mala odstupanja dobivenih rezultata u segmentima 9, 10, 11, 12 i 13 odnosno od najnižeg segmenta u kojem se nalazi izmjenjivačka površina pomoćnog grijaća pa sve do najvišeg segmenta u spremniku.



Slika 28. Usporedba srednje temperature vode po segmentima dobivene računalnom simulacijom i izračunatih prema normi nakon 52 minute bez potrošnje PTV-a u zimskom režimu rada

10. STUPANJ EFIKASNOSTI KOLEKTORA

Poznavanje temperaturne stratifikacije potrošne tople vode u dijelu spremnika gdje se nalazi solarni izmjenjivač je zanimljivo u pogledu utjecaja na stupanj efikasnosti kolektora.

Kako je u modelu spremnika pretpostavljeno da se kroz cijelu izmjenjivačku površinu dovodi konstantan toplinski tok što u stvarnosti nije slučaj, napravljen je model solarnog izmjenjivača. Račun se provodi kroz segmente spremnika 2, 3, 4, 5 i 6 u kojima se nalazi solarni izmjenjivač. Korištene su osrednjene temperature vode u segmentima koje su dobivene računalnom simulacijom za ljetni režim rada. Pretpostavljena je ulazna temperatura radne tvari kolektorskog kruga koja iznosi 55 °C.

Toplinski tok koji se unosi u pojedini segment se računa prema slijedećoj jednadžbi

$$\Phi_{\mathrm{sto;vol;i}} = \mathrm{k} \cdot (\vartheta_{\mathrm{sto;vol;i}} - \vartheta_{\mathrm{kol;sr;i}}) \cdot A_i \tag{10.1}$$

Gdje k predstavlja koeficijent prolaza topline za koji je pretpostavljeno da je konstantan duž izmjenjivača. Srednja temperatura radne tvari u pojedinom segmentu $\vartheta_{\mathrm{kol;sr;i}}$ je aritmetička sredina temperature sa kojom radna tvar ulazi u segment $\vartheta_{\mathrm{kol;ulaz;i}}$ i temperature sa kojom radna tvar izlazi iz segmenta $\vartheta_{\mathrm{kol;izlaz;i}}$. Član A_i predstavlja površinu izmjenjivača u segmentu i.

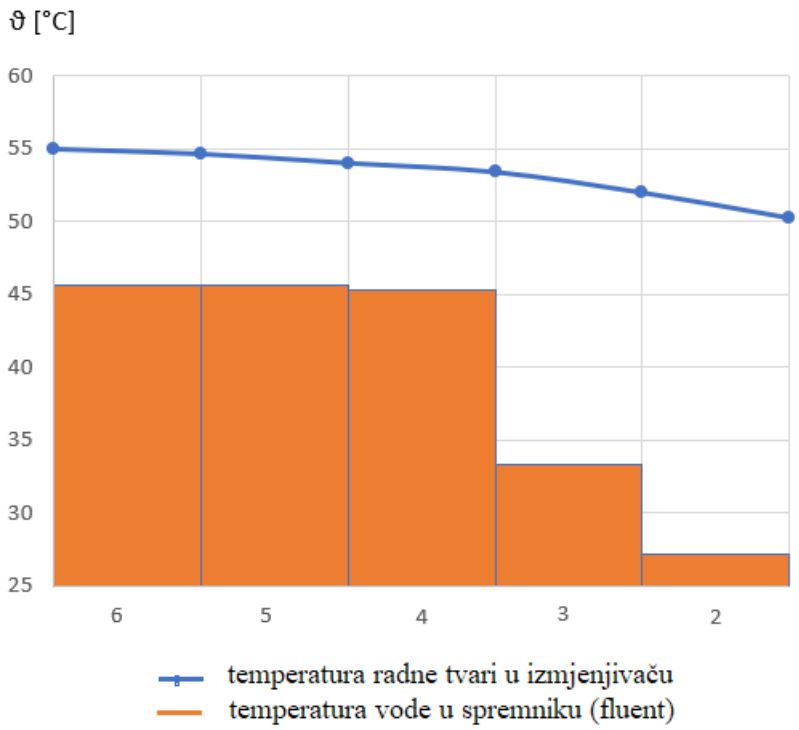
Izlazna temperatura iz segmenta se računa prema slijedećem izrazu

$$\vartheta_{\mathrm{kol;izlaz;i}} = \vartheta_{\mathrm{kol;ulaz;i}} - \frac{\Phi_{\mathrm{sto;vol;i}}}{c_w \cdot \dot{m}_{kol}} \tag{10.2}$$

Vrijednost masenog protok vode u kolektoru $\dot{m}_{kol}$ je određena iskustveno prema površini kolektora i iznosi 0.08 kg/s.

Proračun se vodi iterativno tako da se pogađao koeficijent prolaza topline sve dok se ne bi zadovoljio ukupni toplinski tok koji se izmjenjuje između radne tvari i vode u spremniku u iznosu od 1625 W. Konačni koeficijent prolaza topline iznosi 117.5 W/(m^{2}K). Radna tvar kolektorskog kruga se ohladila sa početnih 55 °C na 50.28 °C.

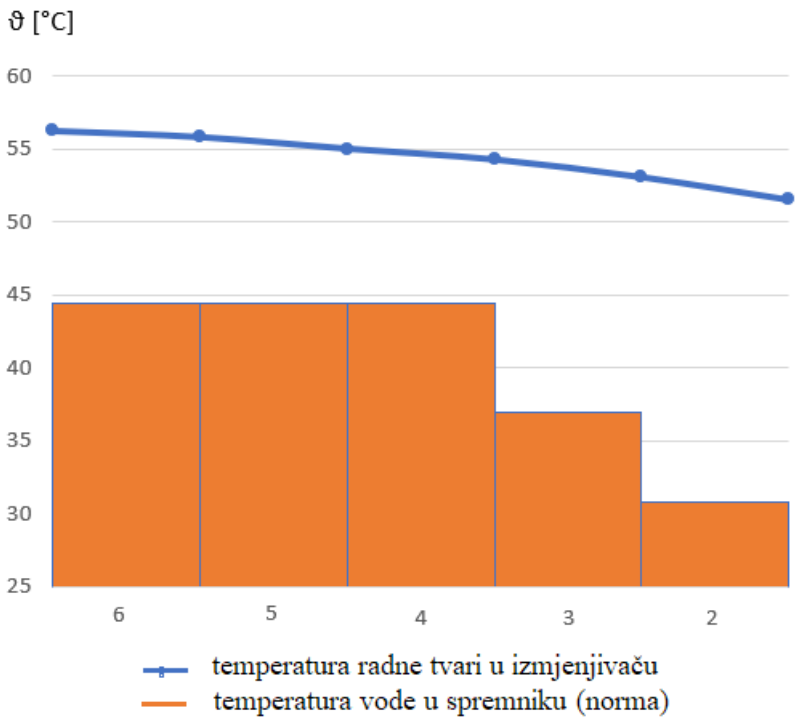
U dijagramu na slici 29. je prikazano opadanje temperature radne tvari tijekom izmjene topline sa vodom u spremniku.



Slika 29. Promjena temperature radne tvari kolektorskog kruga prolaskom kroz izmjenjivač u spremniku (vrijednost temperature potrošne vode je dobivena računalnom simulacijom).

Analogno gornjem proračunu napravljen je proračun u kojem su uzete vrijednosti temperature vode u segmentima izračunate prema normi. Vrijednost koeficijenta prolaza topline je uzeta iz prethodnog proračuna tako da se proračun vodio iterativno pogađanjem ulazne temperature radne tvari sve dok se ne bi zadovoljio ukupni toplinski tok.

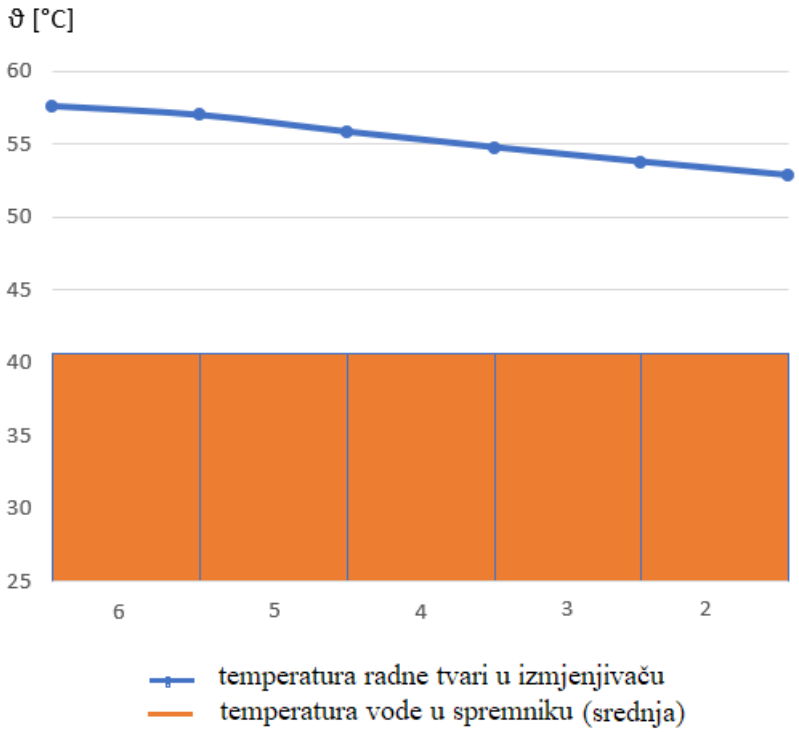
U dijagramu na slici 30. se vidi kako temperatura radne tvari kolektorskog kruga opada prolaskom kroz izmjenjivač topline u spremniku sa 56.25 °C na 51.25 °C, što uzrokuje pad temperature od 4.73 °C u odnosu na prvi slučaj kada te temperatura radnog fluida pala za 4.72 °C.



Slika 30. Promjena temperature radne tvari kolektorskog kruga prolaskom kroz izmjenjivač u spremniku (vrijednost temperature potrošne vode je dobivena prema normi).

Analogno gornjem slučaju napravljen je proračun gdje se za temperaturu PTV-a uzete srednja vrijednost temperature vode u cijelom spremniku koja se dobije klasičnim termodinamičkim proračunom (ovdje je korištena srednja vrijednost temperature vode dobivenih proračunom prema normi).

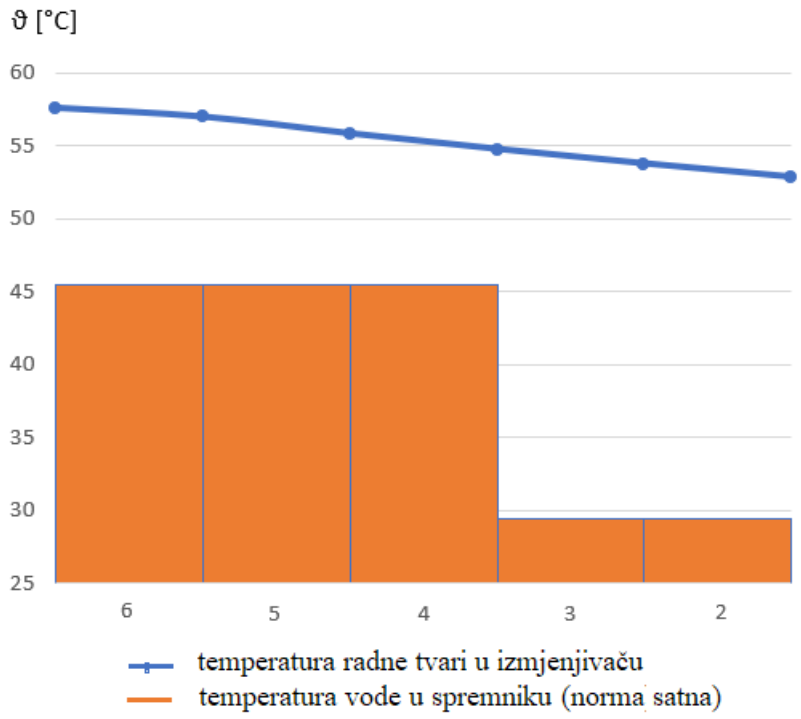
U dijagramu na slici 31. se vidi kako temperatura radne tvari ohladi prolaskom kroz izmjenjivač sa početnih 57.55 °C na 52.83 °C.



Slika 31. Promjena temperature radne tvari kolektorskog kruga prolaskom kroz izmjenjivač u spremniku (vrijednost temperature potrošne vode je dobivena klasičnim termodinimačkim proračunom).

U zadnjem slučaju je napravljen proračun sa vrijednostima PTV-a dobivenih satnom simulacijom prema normi. U ovom je slučaju radi zadovoljavanja toplinskog toka temperatura radne tvari pala sa 54.63 °C na 49.91 °C prolaskom kroz izmjenjivač.

U dijagramu na slici 32. se vidi kako temperatura radne tvari opada opada prolaskom kroz izmjenjivač.



Slika 32. Promjena temperature radne tvari kolektorskog kruga prolaskom kroz izmjenjivač u spremniku (vrijednost temperature PTV-a je dobivena prema normi (satna)).

Dalje je zanimljivo vidjeti kako dobivene vrijednosti temperature radne tvari kolektorskog kruga utječu na stupanj efikasnosti pločastog kolektora auro THERM Vaillant VFK 145/2 i na stupanj efikasnosti vakuumskog kolektora auro THERM Vaillant VTK 570/2.

Jednadžbe preko koje se računaju stupnjevi efikasnosti kolektora su dobivene od proizvođača te one glase:

$$\eta_{kol;pločasti} = 0.79 - 3.721 \cdot \frac{\vartheta_{f,sr} - \vartheta_z}{G_{sun}} - 0.016 \cdot \frac{(\vartheta_{f,sr} - \vartheta_z)^2}{G_{sun}} \qquad (10.3)$$

$$\eta_{kol;vakuumski} = 0.642 - 0.885 \cdot \frac{\vartheta_{f,sr} - \vartheta_z}{G_{sun}} - 0.001 \cdot \frac{(\vartheta_{f,sr} - \vartheta_z)^2}{G_{sun}} \qquad (10.4)$$

Pri čemu je srednja temperatura radnog fluida $\vartheta_{f,sr}$ aritmetička sredina temperature sa kojom fluid ulazi u izmjenjivač i temperature sa kojom izlazi iz izmjenjivača u spremniku. Srednja temperatura vanjskog zraka u srpnju je $\vartheta_z = 26$ °C. Sunčevo upadno zračenje na nagnutu plohu G_{sun} iznosi 593.14 W u 13 sati na području Zagreba.

U tablici 18. su dane vrijednosti stupnja efikasnosti pločastog i vakuumskog kolektora gdje se vidi da apsolutne razlike dobivenih stupnjeva efikasnosti kolektora ne odstupaju značajnije.

Tablica 18. Usporedba stupnjeva efikasnosti pločastog i vakumskog kolektora u slučajevima kada se u proračun ulazilo sa temperaturom potrošne vode dobivene računalnom simulacijom, računom prema normi i klasičnim termodinamičkim proračunom.

	Fluent	Norma	Term. pror.	Norma (satna)	Fluent-Norma	Fluent-Term. pror	Fluent-Norma(satna)
$\eta_{kol;pločasti}$	60.37%	59.41%	58.39%	60.66%	0.96%	1.98%	-0.29%
$\eta_{kol;vakuumski}$	60.11%	59.91%	59.70%	60.16%	0.20%	0.41%	-0.05%

Iz ove analize gdje se uspoređuju vrijednosti stupnja efikasnosti kolektora u tri slučaja proizlaze određeni zaključci koji su navedeni u idućem poglavlju.

11. ZAKLJUČAK

Glavni smisao ovog rada je vidjeti kako dinamički karakter solarnog spremnika uzimajući u obzir i temperaturnu stratifikaciju potrošne tople vode unutar njega ima utjecaj na stupanj efikasnosti kolektora.

Zbog izuzetno složenog dinamičkog karaktera realnog spremnika nije moguće napraviti analitički proračun temperature vode u solarnom spremniku, stoga su dinamičkom modelu uvedena određena pojednostavljenja s ciljem usporedbe dobivenih rezultata.

Prilikom projektiranja solarnog toplovodnog sustava potrebno je uzeti u obzir vrijeme potrebno da se napravi proračun i ekonomska isplativost, stoga inženjerska praksa često nalaže pojednostavljene proračune. U ovome je radu stoga zanimljivo vidjeti kolika su odstupanja rezultata dobivenih računalnom dinamičkom simulacijom numeričkog modela u programu ANSYS Fluent od onih rezultata dobivenih proračunom prema normi HRN EN 15316-5:2017 i klasičnim termodinamičkim proračunom. Potrebno je ovdje napomenuti da je norma namijenjena satnoj metodi koja je za potrebe ovog rada provedena na minutnom vremenskom koraku prilikom potrošnje PTV-a.

Temperaturno polje dobiveno računalnom simulacijom nam daje jasniju sliku dinamičkog ponašanja u solarnom spremniku, ali potrebno je izuzetno puno vremena kako bi se napravio i izračunao numerički model spremnika. Isto tako treba uzeti u obzir da računalni programski paketi kojima je provodi računalna simulacija nisu besplatni za komercijalnu upotrebu, zahtijevaju puno znanja i bolju računalnu opremu.

Za ocjenu dobivenih rezultata zanimljivo je vidjeti kako dobiveno temperaturno polje u oba slučaja utječe na stupanj efikasnosti kolektora. Kako je u proračunu prema normi spremnik podijeljen na 13 segmenata jednakih volumena bilo je potrebno rezultate dobivene računalnom simulacijom uprosječiti za te iste segmente kako bi rezultati bili usporedivi. Usporedbom dobivenih temperatura po pojedinim segmentima uočena su određena temperaturna odstupanja koja su izraženija u nižim segmentima u kojima se nalazi solarni izmjenjivač. Dalje se preko tih dobivenih vrijednosti temperature PTV-a uz određene pretpostavke i pojednostavljenja računala temperatura radnog fluida u solarnom izmjenjivaču.

Iz dobivenih vrijednosti temperature radnog fluida se računao stupanj efikasnosti za pločasti kolektor auro THERM Vaillant VFK 145/2 i vakuumski kolektor auro THERM Vaillant VTK 570/2 prema jednadžbama dobivenih od proizvođača.

Apsolutna razlika stupnjeva efikasnosti između vrijednosti dobivenih proračunom u koji se ulazilo sa temperaturom PTV-a dobivene preko računalne simulacije i temperaturom PTV-a dobivene prema normi je iznosila 0.96% za pločasti i 0.20% za vukuumski kolektor.

Nisu značajnije odstupale ni vrijednosti stupnjeva efikasnosti dobivene preko proračuna u koji se ulazilo sa temperaturom PTV-a dobivene preko klasičnog termodinamičkog proračuna. Apsolutna razlika u odnosu na računalnu simulaciju je iznosila 1.98% za pločasti i 0.41% za vakuumski kolektor.

Stupnjevi efikasnosti kolektora dobiveni jednostavnijim termodinimačkim proračunom (uniformna temperatura vode u cijelom spremniku) ne odstupaju značajnije od onih dobivenih zahtjevnijim proračunima (računalna simulacija, norma) stoga se zaključuje kako klasični termodinamički proračun sasvim dovoljan prilikom računanja stupnja efikasnosti kolektora. Ipak ove rezultate treba uzeti s oprezom. Potrebno je provesti simulacije cijelog sustava (uključujući i sam kolektor) sa dužim trajanjem simulacija (npr. jedan dan ili više).

LITERATURA

[1] Petar Kulušić, Jadranka Vuletin, Ivan Zulim, Sunčane Čelije, Školska knjiga, Zagreb, 1994

[2] Damir Dović, Obnovljivi izvori energije, Uporaba sunčeve energije u termotehničkim sustavima, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2012

[3] International energy agency, www.iea.org

[4] Toplinske tablice, FSB Zagreb, 2011

[5] Damir Dović, Numerička i eksperimentalna studija sunčevog kolektora s valovitim apsorberom, Doktorski rad 2005

[6] Mehanika fluida II, FSB Zagreb, 2013/2014

PRILOZI

I. CD-R