Modeliranje potrošača energije s vlastitom proizvodnjom - Analiza slučaja za naselje Trnsko u Zagrebu

Kodba, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:235:013256

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Bruno Kodba

Zagreb, godina 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Tomislav Pukšec, dipl. ing.

Student:

Bruno Kodba

Zagreb, godina 2018.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, doc. dr. sc. Tomislavu Pukšecu, dipl. ing. na pruženoj prilici za izradu ovog rada kao i asistentu Borni Doračiću, mag. ing. na trudu koji je uložio, korisnim savjetima i strpljenju.

Također, htio bih se zahvaliti i svojoj djevojci Ani i obitelji, posebno majci Miri i bratu Mariju, na njihovoj potpori, razumijevanju i ljubavi tijekom cijelog školovanja.

Bruno Kodba

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: **Bruno Kodba** Mat. br.: 0035186832

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje potrošača energije s vlastitom proizvodnjom – Analiza slučaja za naselje Trnsko u Zagrebu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modelling of energy prosumers – Case study for the Trnsko neighbourhood in Zagreb**

Opis zadatka:

Potrošači energije s vlastitom proizvodnjom su kućanstva, zadruge, industrijski subjekti te slična udruženja, organizacije i firme koje u isto vrijeme troše i proizvode energiju. Oni na taj način predstavljaju mala, decentralizirana energetska postrojenja koja bi u budućim energetskim sustavima trebala igrati ključnu ulogu integracije obnovljivih izvora. Cilj ovog rada je analiza izvedivosti jednog takvog sustava kroz dva scenarija koji će uključivati proizvodnju kako toplinske tako i električne energije. Za analizu slučaja odabrano je naselje Trnsko u Zagrebu.
U radu je potrebno:

1. Napraviti opsežan pregled literature na temu potrošača energije s vlastitom proizvodnjom na razini EU i Republike Hrvatske, uključujući postojeće slučajeve te zakonodavni okvir,
2. Prikupiti potrebne ulazne podatke za modeliranje odabranog slučaja pomoću alata energyPRO,
3. Analizirati tehničku mogućnost te ekonomsku isplativost primjene koncepata potrošnje energije s vlastitom proizvodnjom kroz barem dva scenarija različitih kombinacija proizvodnih tehnologija,
4. Izračunati emisije CO_2 za oba razvijena scenarija,
5. Izračunati ključne parametre poput udjela vlastite potrošnje i energije predane u mrežu.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
3. svibnja 2018.	5. srpnja 2018.	11., 12. i 13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Tomislav Pukšec

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA IV

POPIS TABLICA VI

POPIS OZNAKA VII

SAŽETAK X

SUMMARY XI

1. UVOD 1

1.1. Pametne mreže 2

2. ZAKONODAVNI OKVIR 7

2.1. Pariški sporazum o klimatskim promjenama 7

2.2. Čista energija za sve Europljane 7

2.3. Ciljevi Europske unije do 2050. godine 8

2.4. Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji 11

3. METODA 14

3.1. EnergyPRO 14

3.2. Geoportali 18

3.3. Određivanje toplinskih potreba 19

3.3.1. Potrošna topla voda (PTV) 20

3.3.2. Grijanje 20

3.4. Određivanje potreba za električnom energijom 21

3.5. Tržište električnom energijom 22

3.6. Proizvodni sustavi 24

3.6.1. Kogeneracijska postrojenja 25

3.6.2. Električna dizalica topline 25

3.6.3. Pločasti solarni kolektori ... 26
3.6.4. Fotonaponske ćelije ... 28
3.6.5. Toplinski spremnici ... 29
3.7. Izračun ekonomskih pokazatelja ... 30
3.8. Izračun emisije CO_2 ... 33
4. ANALIZA GRADSKOG NASELJA TRNSKO ... 34
4.1. Opći podatci o naselju ... 34
4.2. Meteorološki podatci ... 35
4.3. Toplinske potrebe ... 36
4.3.1. Potrošna topla voda ... 36
4.3.2. Grijanje ... 37
4.4. Potreba za električnom energijom ... 38
4.5. Dostupne površine za postavljanje solarnih kolektora i fotonaponskih ćelija ... 39
4.6. Burza električne energije ... 41
5. SCENARIJI ... 42
5.1. Referentni scenarij ... 42
5.2. Scenarij 1 ... 43
5.3. Scenarij 2 ... 45
5.4. Scenarij 3 ... 47
6. REZULTATI ... 48
6.1. Scenarij 1 ... 49
6.2. Scenarij 2 ... 53
6.3. Scenarij 3 ... 56
6.4. Ekonomski pokazatelji ... 59

6.5. Emisija CO_2 61

7. ZAKLJUČAK 62

ZAHVALA 64

LITERATURA 65

POPIS SLIKA

Slika 1. Utjecaj veličine grupe na pogrešku pri predviđanju [7] 4
Slika 2. Modeli energetskih tržišta [4] 4
Slika 3. Shema peer to peer tržišta [8] 5
Slika 4. Emisija stakleničkih plinova Europske unije do 2050. godine [14] 9
Slika 5. Udio električne energije u finalnoj potrošnji do 2050. godine [15] 10
Slika 6. Udio pojedinih energenata u potrošnji primarne energije u 2050. godini te usporedba s 2005. godinom [15] 11
Slika 7. Primjer modela izrađenog alatom EnergyPRO [17] 14
Slika 8. Moduli u EnergyPRO alatu [17] 15
Slika 9. Prikaz *Design* (gore) i *Finance* (dolje) modula [17] 17
Slika 10. Primjer nekronološkog proračuna [19] 18
Slika 11. Mjerenje površina preko geoportala [20] 19
Slika 12. Satna potrošnja PTV-a prosječnog kućanstva [% ukupne potrošnje] [22] 20
Slika 13. Satna krivulja potrošnje električne energije Hrvatske 22
Slika 14. Ilustracija *merit ordera* [24] 23
Slika 15. Kretanje cijena na dan unaprijed tržištu, CROPEX [25] 24
Slika 16. Shema rada električne dizalice topline [26] 26
Slika 17. Vrijednosti modifikatora kuta učestalosti [27] 27
Slika 18. Shema malog fotonaponskog sustava [23] 28
Slika 19. Satelitska snimka zagrebačkog gradskog naselja Trnsko [20] 34
Slika 20. Godišnja satna distribucija temperature zraka okoliša 35
Slika 21. Godišnja satna distribucija ozračenja horizontalne plohe 35
Slika 22. Dnevna potreba za potrošnom toplom vodom 36
Slika 23. Razlike u mjesečnoj potrebi toplinske energije za pripremu PTV-a 37

Slika 24. Godišnja satna distribucija toplinske snage za pripremu PTV-a naselja Trnsko 37
Slika 25. Godišnja satna distribucija toplinske snage za grijanje naselja Trnsko 38
Slika 26. Godišnja satna distribucija električne snage za Trnsko 39
Slika 27. Prikaz tlocrtnih površina zgrada u Trnskom [20] 40
Slika 28. Cijena električne energije, CROPEX [25] 41
Slika 29. Godišnje satne vrijednosti COP-a 45
Slika 30. Dimenzioniranje CHP-a 46
Slika 31. Scenarij 1: Godišnja satna krivulja proizvodnje toplinske energije i prikaz tipičnih mjeseci 49
Slika 32. Scenarij 1: Godišnja proizvodnja električne energije 50
Slika 33. Scenarij 1: Krivulja trajanja toplinskog opterećenja 51
Slika 34. Scenarij 1: Krivulja trajanja električnog opterećenja 51
Slika 35. Scenarij 2: Godišnja krivulja proizvodnje toplinske energije 53
Slika 36. Scenarij 2: Godišnja krivulja proizvodnje električne energije 54
Slika 37. Scenarij 2: Krivulja trajanja toplinskog opterećenja 55
Slika 38. Scenarij 2: Krivulja trajanja električnog opterećenja 55
Slika 39. Scenarij 3: Godišnja krivulja proizvodnje toplinske energije (gore) i napunjenost toplinskog spremnika (dolje) 56
Slika 40. Scenarij 3: Proizvodnja toplinske energije u tipičnom ljetnom mjesecu 57
Slika 41. Scenarij 3: Proizvodnja toplinske energije u zimskom periodu 57
Slika 42. Scenarij 3: Krivulja trajanja toplinskog opterećenja 58
Slika 43. Scenarij 3: Godišnja krivulja proizvodnje električne energije 59
Slika 44. Scenarij 3: Krivulja trajanja električnog opterećenja 59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba konvencionalnih korisnika mreže s korisnicima pametne mreže [3] 2
Tablica 2. Krovne površine stambenih zgrada 40
Tablica 3. Tehnologije korištene u scenarijima 42
Tablica 4. Specifikacija plinskih kotlova 42
Tablica 5. Specifikacija pločastih kolektora 43
Tablica 6. Specifikacija fotonaponskih ćelija 44
Tablica 7. Specifikacija kogeneracijskog postrojenja 46
Tablica 8. Specifični trošak proizvodnje toplinske energije 60
Tablica 9. Udio vlastite potrošnje električne energije i energija predana u mrežu 60
Tablica 10. Godišnja emisija CO_2 61

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
C_i	kn/kWh	Minimalna vrijednost električne energije
E_{pi}	kn/kWh	Ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca unutar obračunskog razdoblja i
E_i	kn/kWh	Ukupna električna energija isporučena u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca, unutar obračunskog razdoblja i
PKC_i	kn/kWh	Prosječna jedinična cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja i
$Q_{H,\,i}$	W	Toplinska snaga za grijanje prostora u i-tom satu
a	-	Konstanta, prikazuje potrebnu toplinsku snagu za jedan stupanj razlike između referentne i okolišne temperature
T	°C	Referentna temperatura
$T_{a,\,i}$	°C	Prosječna temperatura zraka okoliša u i-tom satu
Q_H	Wh	Ukupno toplinsko opterećenje tijekom godine
η_{el}	-	Električna iskoristivost
η_{to}	-	Toplinska iskoristivost
P_{el}	MW	Maksimalna električna snaga
P_{to}	MW	Maksimalna toplinska snaga
η_a	-	Konverzijski faktor
a_1	$W/m^2°C$	Koeficijent gubitaka
a_2	$W/m^2°C$	Koeficijent gubitaka

K^{Θ}	-	Modifikator kuta učestalosti
P_{max}	W	Maksimalna snaga
k_{Pmax}	%/°C	Temperaturni koeficijent snage
NOCT	°C	Normalna radna temperatura ćelije
$Q_{gub,\ spr}$	MW	Toplinski gubici spremnika
λ	W/m°C	Koeficijent toplinske provodljivosti
s	mm	Debljina stijenke
V	m^3	Volumen spremnika
h	m	Visina spremnika
$T_{spr,\ i}$	°C	Temperatura unutar spremnika u i-tom satu
AC_a	kn	Ukupni godišnji trošak proizvodnje i potrošnje električne i toplinske energije
$CC_{a,i}$	kn	godišnji investicijski trošak proizvodne jedinice *i*
$FO\&M_{i,a}$	kn	godišnji fiksni trošak održavanja proizvodne jedinice *i*
$VO\&M_{i,a}$	kn	godišnji varijabilni trošak održavanja proizvodne jedinice *i*
$FC_{i,a}$	kn	godišnji trošak goriva proizvodne jedinice *i*
$C_{el,a}$	kn	godišnji trošak električne energije otkupljene iz mreže
$C_{h,a}$	kn	godišnji trošak toplinske energije otkupljene iz mreže
$S_{el,a}$	kn	godišnji prihod ostvaren prodajom električne energije
$S_{H,a}$	kn	godišnji prihod ostvaren prodajom toplinske energije
IC_i	kn/MWh	investicijski trošak tehnologije *i*
P_i	MW	instalirana snaga tehnologije *i*
CRF	-	faktor povrata kapitala
D	%	diskontna stopa
N	god	životni vijek postrojenja

$FO\&M_i$	kn/MW	fiksni trošak održavanja proizvodne jedinice *i*
$VO\&M_i$	kn/MWh	varijabilni trošak proizodnje energije proizvodne jedinice *i*
CF	-	faktor opterećenja, postotak vremena u kojem proizvodna jedinice radi pri punoj snazi
FC_i	kn/MWh	trošak goriva koje se koristi za pogon proizvodne jedinice *i*, sveden na jedinicu energije
η_i	%	iskoristivost proizvodne jedinice *i*
$C_{el,j}$	kn/MWh	cijena električne energije otkupljene po tarifi *j*
$E_{el,j}$	MWh	električna energija otkupljena po tarifi *j*
$C_{h,k}$	kn/MWh	cijena toplinske energije, otkupljene po tarifi k
$E_{h,k}$	MWh	toplinska energija, otkupljena po tarifi k
$E_{el,l}$	MWh	električna energija, isporučena mreži pri cijeni električne energije l
$S_{el,l}$	kn/MWh	prodajna cijena električne energije pri cijeni električne energije l
$C_{h,spec}$	kn/MWh	Specifični trošak proizvodnje toplinske energije
$m_{CO2,\,uk}$	kg/MWh	specifična ukupna emisija CO_2
u_i	%	udio i-tog energenta
$m_{CO2,\,i}$	kg/MWh	specifične emisije CO_2 i-tog energenta
$m_{CO2,\,kog}$	kg/MWh	specifične emisije ugljičnog dioksida za gorivo kogeneracije
η	%	toplinska iskoristivost kogeneracije
ε_{el}	-	omjer proizvedene električne i toplinske energije
$m_{CO2,\,el}$	kg/MWh	specifična emisija ugljičnog dioksida za električnu energiju

SAŽETAK

Uklapanje *prosumera* u većem obujmu u elektroenergetski sustav tema je koja se u svjetskim okvirima intenzivirala u proteklih 10-ak godina. Predvodnik u tome je Europska unija koja svojim inicijativama i direktivama nastoji potaknuti tranziciju na novi sustav u kojem će, na jedinstvenom europskom energetskom tržištu, važnu ulogu imati potrošači s vlastitom proizvodnjom.

Cilj ovog rada analiza je tehno-ekonomskih mogućnosti uklapanja različitih kombinacija tehnologija baziranih na obnovljivim izvorima energije za proizvodnju toplinske i električne energije u današnji energetski sustav. Važan naglasak stavljen je na mogućnost izmjene električne energije s tržištem čime se ispunjava definicija *prosumera*. U prvome dijelu rada daje se kratki uvid u moguće izglede pametnih mreža budućnosti te zakonodavne okvire na razini Europske unije i Republike Hrvatske. Nakon toga, opisan je način prikupljanja podataka korištenih u ovome radu kao i računalnih alata koji su korišteni.

Kao primjer naselja čije potrebe treba zadovoljiti, uzeto je zagrebačko naselje Trnsko, smješteno u južnom dijelu grada. Prikupljeni su podatci o broju stanovnika, toplinskim i električnim potrebama, dostupnim krovnim površinama i meteorološki podatci na temelju kojih su modelirane proizvodne jedinice.

U nastavku rada, definirane su kombinacije proizvodnih tehnologija za svaki scenarij te su prikazani dobiveni rezultati, na temelju kojih će se donijeti zaključak.

Ključne riječi: Potrošač s vlastitom proizvodnjom, pametna mreža, tržište električne energije, Energy PRO

SUMMARY

Integration of a large number of prosumers into the power system draws high interest in the world in the last 10 years. The leader of this initiative is the European Union, which seeks to promote the transition to a new system, one single European energy market, where prosumers would have an important role.

The aim of this thesis is to analyse the technical and economic possibilities of three different scenarios. Each of the scenarios contain unique combination of renewable sources based energy conversion technologies for production of heat and electricity. Emphasis was put on the ability of subjects to exchange electricity on the energy market, thus fulfilling the definition of prosumers.

The first part gives a brief insight into the possible designs of future smart networks and legislative framework at the level of the European Union and the Republic of Croatia. Then, the method of data collecting in this thesis is presented and computer tools used are described.

The calculation in this paper is made for the Trnsko neighbourhood in the city of Zagreb, located in the southern part of the city. Population data, heating and electricity needs, available roof surfaces and meteorological data are used to make a computer model of the neighbourhood.

In the last two chapters the results of calculations are presented and a conclusion based on the results is made.

Key words: prosumers, smart grid, electricity market, EnergyPRO

1. UVOD

Tradicionalno gledajući, sudionici elektroenergetskog sustava dijelili su se striktno na proizvođače i na potrošače. Tok energije u sustavu bio je jednosmjeran: proizvodnja – prijenos – distribucija - potrošač. Razvojem distribuiranih energetskih izvora, spremnika energije te načina odgovora na potražnju za energijom (eng. *Demand side menagement*), omogućeno je sudjelovanje potrošača u proizvodnji i pohrani energije. Taj novi sudionik elektroenergetskog sustava koji je izravno uključen u gospodarske procese naziva se potrošač s vlastitom proizvodnjom (eng. *prosumer*) [1].

Pojam *prosumer* prvi se put pojavljuje 1980. godine u knjizi „Treći val“ [2], američkog pisca i futurista Alvina Tofflera koji je „proizvodnju – potrošnju“ opisao kao pojavu kojom se briše razlika između proizvođača i potrošača. Ideju tržišta u kojem će razvojem novih tehnologija proizvodnje električne energije potrošači biti aktivni sudionici još su 1972. godine predvidjeli Marshall McLuhan i Barrington Nevitt [3].

Porastom broja subjekata koji u isto vrijeme proizvode i troše električnu energiju, izvjesno je da će elektroenergetski sektor u narednim desetljećima doživjeti velike promjene što sa sobom nosi mnoge rizike i nepoznanice [4]. Jedan od izazova predstavlja efikasna i ekonomski isplativa integracija *prosumera* na tržište, tako da se ostvare uvjeti koji će osiguravati svim sudionicima energetskog tržišta korist od razvoja potrošača s vlastitom proizvodnjom. Također, potrebno ih je zaštiti od monopolističkih praksi prijenosnika i distributera električne energije te velikih proizvođača [3].

Razvoj tehnologije, u kombinaciji s promjenama na tržištu električne energije, otvara mogućnosti za stvaranje tzv. pametnih mreža (eng. *smart grid*). Pametne mreže predstavljaju elektroenergetske sustave koji integriraju potrošače, proizvođače i potrošače s vlastitom proizvodnjom te ih karakterizira višesmjerni tok energije [5].

U ovom radu kroz tri će scenarija biti analizirana tehnička mogućnost te ekonomska isplativost primjene koncepata potrošnje energije s vlastitom proizvodnjom za zagrebačko gradsko naselje Trnsko. Kućanstva se neće promatrati zasebno, već kao cjelina, grupa *prosumera*, čiji je glavni

cilj zadovoljavanje vlastitih energetskih potreba. Intermitentnost obnovljivih izvora energije dovesti će do viškova, odnosno manjkova, vlastito proizvedene energije u pojedinim periodima dana. Višak energije prodavat će se u mrežu ili spremati u energetski spremnik, dok će se manjak namirivati iz mreže. Temeljem izračunatih emisija CO_2 te ključnih parametara kao što su udio vlastite potrošnje i električne energije predane u mrežu za svaki od scenarija donijet će se zaključak o ekonomskoj isplativosti.

1.1. Pametne mreže

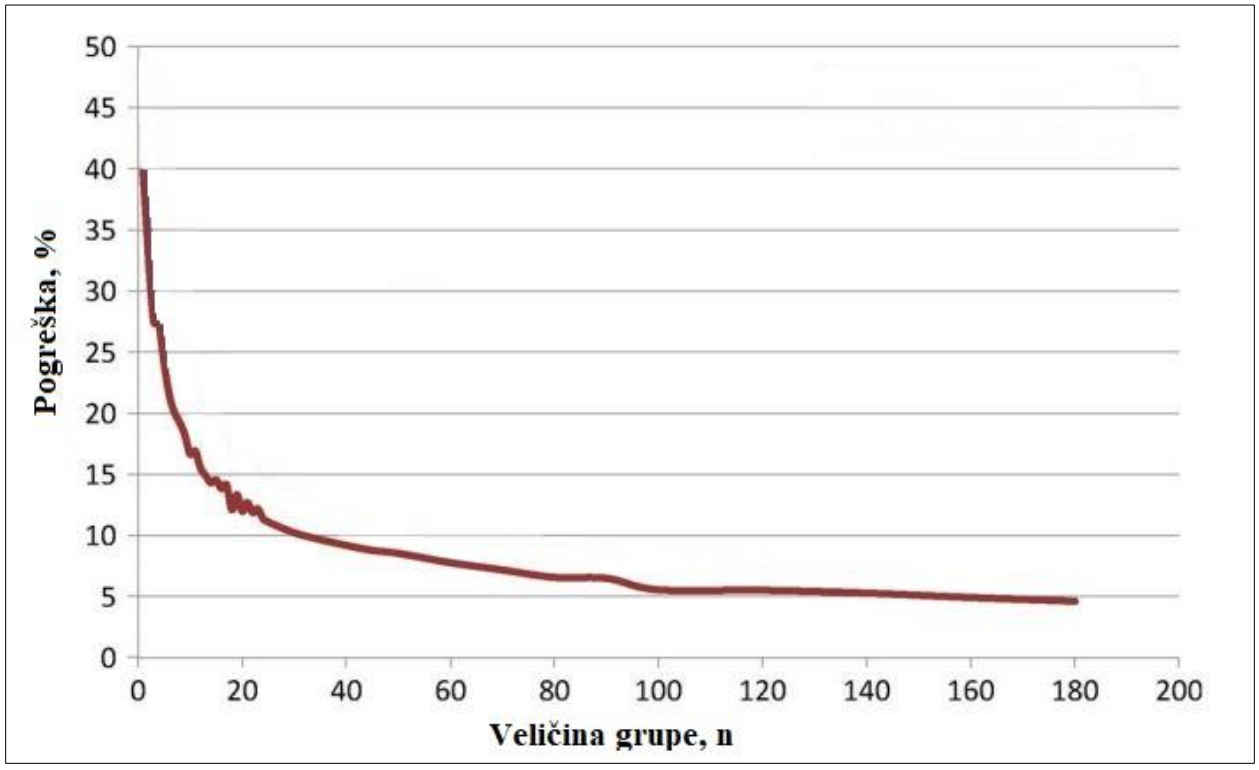
Temelj ovakvih mreža predstavlja sustav pametnog mjerenja koji obuhvaća pametno brojilo, komunikacijsku infrastrukturu, kontrolne uređaje i razne senzore. On omogućava korisnicima nadzor i kontrolu nad kućanskim uređajima, mjeri i ograničava potrošnju električne energije, pruža informacije o mreži te komunicira s drugim sustavima u blizini. Prikupljeni podatci redovno se izmjenjuju između korisnika i pružatelja usluge čime se pružatelju omogućuje vođenje elektroenergetskog sustava na što efikasniji način, a korisniku daje povratna informacija o troškovno optimalnom korištenju kućanskih uređaja [6]. Usporedba konvencionalnih potrošača i korisnika pametne mreže prikazana je u Tablici 1.

Tablica 1. Usporedba konvencionalnih korisnika mreže s korisnicima pametne mreže [3]

	Konvencionalni korisnici mreže	**Pametna mreža potrošača s vlastitom proizvodnjom**
Elastičnost mreže	Operator reagira na promjene u mreži kako bi spriječio nastanak štete, fokus je na reakciji i zaštiti imovine nakon pada sustava	Korisnici ili njihovi uređaji automatski detektiraju i odgovaraju na probleme u prijenosu i distribuciji , fokus je na prevenciji pada sustava
Informiranost i uključenost korisnika	Korisnici nisu informirani i ne sudjeluju u elektroenergetskom sustavu	Korisnici su aktivni, uključeni i informirani
Kvaliteta energetskih usluga	Nije prilagođena za pojedine korisnike, već za velike grupacije korisnika	Modularna i dizajnirana za specifične krajnje korisnike zbog čega varira u kvaliteti

Raznovrsnost proizvodnje	Oslanja se na velike centralizirane proizvodne jedinice s malo mogućnosti za pohranu energije	Potiče se distribuirana proizvodnja upotpunjena decentraliziranim spremnicima energije, kao što su električna vozila, s naglaskom na pristupu i međusobnom povezivanju s obnovljivim izvorima energije i V2G (eng. *Vehicle-to-grid*) sistemima
Kompetitivno tržište	Ograničena veleprodajna tržišta koja i dalje razvijaju optimalni model rada, slabo su prilagođena rješavanju zagušenja ili međusobnoj integraciji	Mnogo efikasnija veleprodajna tržišta s integriranim koordinatorima pouzdanosti i minimalnim prijenosnim zagušenjem i ograničenjima
Optimizacija i efikasnost	Ograničena integracija djelomičnih podataka o radu i održavanja na temelju vremena	Prošireno mjerenje i osjetljivost stanja mreže, tehnologije su integrirane s procesima upravljanja imovinom i održavanjem na temelju uvjeta

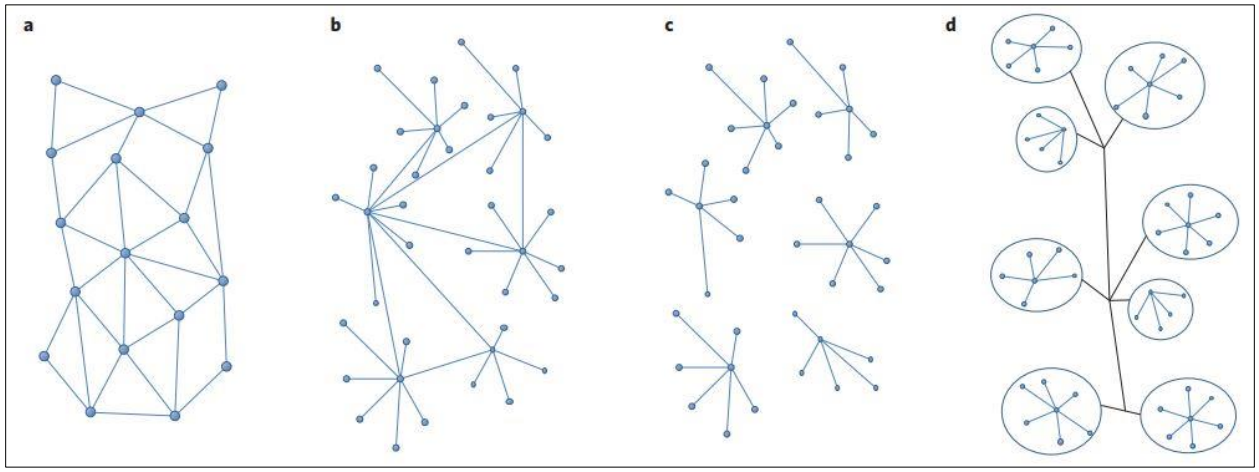
Decentralizacija izvora energije tek je početak stvaranja pametne mreže. Decentralizirani sustavi s velikim brojem integriranih potrošača s vlastitom proizvodnjom zahtijevaju tržište koje će biti prilagođeno njihovoj proizvodnji i potrošnji energije. U usporedbi s današnjim tržištem, buduće tržište bit će mnogo složenije zbog potrebe da se zadovolji veliki broj malih, distribuiranih proizvođača i potrošača energije [4]. Ključnu ulogu u tome mogla bi imati lokalna tržišta. Lokalna tržišta predstavljaju mehanizme upravljanja distribuiranom proizvodnjom, a njihov uspjeh temelji se na preciznim prognozama potrošnje i proizvodnje sudionika. Iako pristup predviđanja proizvodnje i potrošnje individualnih kućanstava često dovodi do velikih pogrešaka, njih je moguće smanjiti grupiranjem korisnika, što prikazuje Slika 1. [7].



Slika 1. **Utjecaj veličine grupe na pogrešku pri predviđanju** [7]

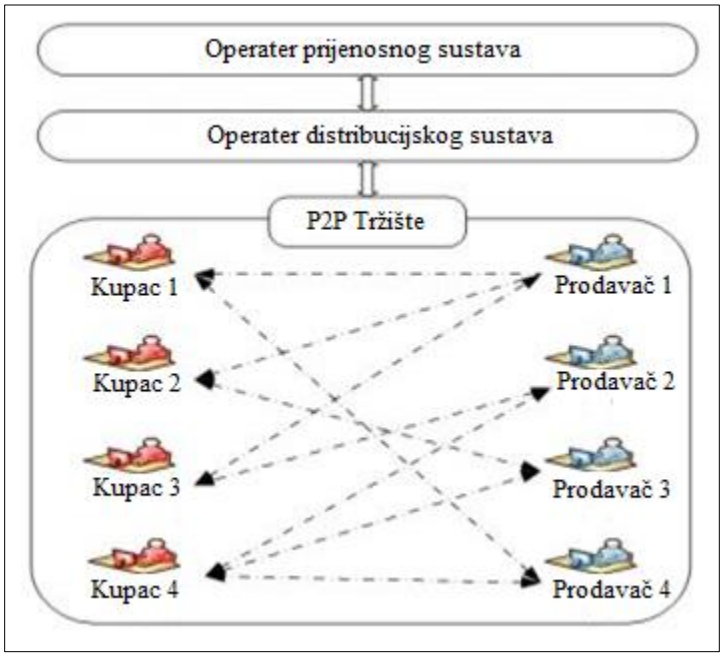
Tri su moguća modela budućih tržišta, a to su:

- *peer-to-peer* tržište (a)
- *prosumer-to-grid* tržište (b,c)
- tržište grupa *prosumera* (d).



Slika 2. Modeli energetskih tržišta [4]

Peer-to-peer tržište najmanje je strukturirano od spomenutih modela te ga karakterizira mnogo decentraliziranih, autonomnih i fleksibilnih sudionika mreže koji međusobno, izravno jedni s drugima, kupuju i prodaju električnu i/ili druge oblike energije. Korisnici koji prodaju električnu energiju najavljuju njen višak za sljedeći vremenski interval, nakon čega ostali korisnici sudjeluju u aukciji za njenu kupnju [8]. Ovakva platforma omogućava korisnicima međusobno sklapanje kratkotrajnih i dugotrajnih ugovora. Pri tome, korisnici plaćaju naknadu za vođenje distribucijske mreže kao i tarife za uslugu prijenosa energije koje ovise o obliku energije i udaljenosti na koju se ona distribuira. Nedostatak ovog modela je visoki trošak izgradnje i održavanja mreže, kao i pouzdanost te osiguravanje odgovornosti za isporuku energije [4]. Slika 3 prikazuje shematski prikaz *peer-to-peer* tržišta.



Slika 3. Shema peer to peer tržišta [8]

Kod *prosumer-to-grid* modela potrošači s vlastitom proizvodnjom povezani su u mikro mreže koje su pak povezane s glavnom mrežom. Težnja korisnika kod ovog je modela na proizvodnji što većih količina električne energije te njena prodaja u glavnu mrežu. Građa ovih sustava je kompliciranija od *peer-to-peer* tržišta te se bazira djelom na direktnoj komunikaciji korisnika s malim proizvođačima, javnim, sportskim i trgovačkim centrima (lokalna mikro-mreža) kao i s velikim proizvođačima energije (glavna mreža), dok u isto vrijeme postoje i tržišna pravila koja

moraju zadovoljiti .Nedostatak *prosumer-to-grid* modela je u integraciji i optimizaciji velikog broja korisnika [4].

Tržište grupa *prosumera* sadržava značajke obaju dosad predstavljenih modela. Ovaj model omogućava korisnicima povezivanje u zajednice, npr. povezivanje lokalnih organizacija ili kućanstava, u svrhu ostvarivanja ekonomske koristi [4]. *Prosumeri* kod ovog modela na tržište izlaze kao partneri, tvoreći virtualno energetsko postrojenje koje je povezano na glavnu mrežu čije se ponašanje dinamički mijenja u ovisnosti o fleksibilnosti članova zajednice. Integracija i optimizacija velikog broja zajednica problem su i kod ovog modela, kao i kompleksnost i visoki troškovi upravljanja, optimizacije i balansiranja pojedinih članova zajednice [9].

Osim tehničkih rješenja, bitno je izraditi i zakonodavne okvire koji će potaknuti tranziciju energetskog sektora. Naredno poglavlje pružit će uvid u dokumente i direktive Europske unije na temu energetske budućnosti Unije kao i uvid u hrvatske zakone vezane uz potrošače s vlastitom proizvodnjom.

2. ZAKONODAVNI OKVIR

2.1. Pariški sporazum o klimatskim promjenama

Kako Protokol iz Kyota, potpisan 1997. godine, nikad u potpunosti nije zaživio jer ga nisu prihvatili glavni zagađivači, Kina i SAD, pojavila se potreba za stvaranjem novog, sveobuhvatnog i obvezujućeg dokumenta koji bi doveo do smanjenja čovjekovog utjecaj na okoliš.

30. listopada 2015. godine u Parizu je započelo zasjedanje 21. Konferencije stranaka Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime. Mjesec i pol dana kasnije, 12. prosinca iste godine, zasjedanje je završilo predstavljanjem Pariškog sporazuma o klimatskim promjenama. Sporazum je tada potpisalo 195 država svijeta, a do danas je ratificiran u 178 država [10].

Tri su glavna cilja koje definira ovaj sporazum. To su: zadržavanje povećanja prosječne globalne temperature na razini znatno nižoj od 2 ˚C u odnosu na predindustrijsko razdoblje, razvoj sposobnosti prilagodbe i otpornosti negativnim utjecajima klimatskih promjena te usklađivanje financijskih tokova usmjerenih na niske emisije stakleničkih plinova [11].

Sporazum naglašava važnost razvoja i korištenja obnovljivih izvora energije, stavljajući poseban naglasak na suradnji između država te korištenja najboljih dostupnih znanstvenih spoznaja. Najrazvijenije zemlje svijeta moraju predvoditi mobilizaciju klimatskog financiranja osiguravajući bespovratna financijska sredstva za pomoć zemljama u razvoju, posebice najmanje razvijenim zemljama i malim otočnim državama [11]. Stranke potpisnice dužne su izrađivati nacionalne planove klimatskog djelovanja za smanjenje emisija te svakih pet godina izvještavati o provedenim mjerama te novim ciljevima čime se osigurava transparentnost i nadzor [12].

2.2. Čista energija za sve Europljane

Europska komisija 30. studenog 2016. godine predstavila je paket mjera naziva Čista energija za sve Europljane (eng. *Clean Energy for all Europeans*), poznat i kao Zimski paket (eng. *Winter Package*). Dio je to paketa od 40 mjera čiji su ciljevi uspostava zajedničkog tržišta energije na razini Europske unije, bolja integracija električne energije dobivene iz obnovljivih izvora

energije, povećanje energetske učinkovitosti u zgradarstvu, industriji i transportu, uspostava Energetske Unije te pravedan odnos prema potrošačima [12].

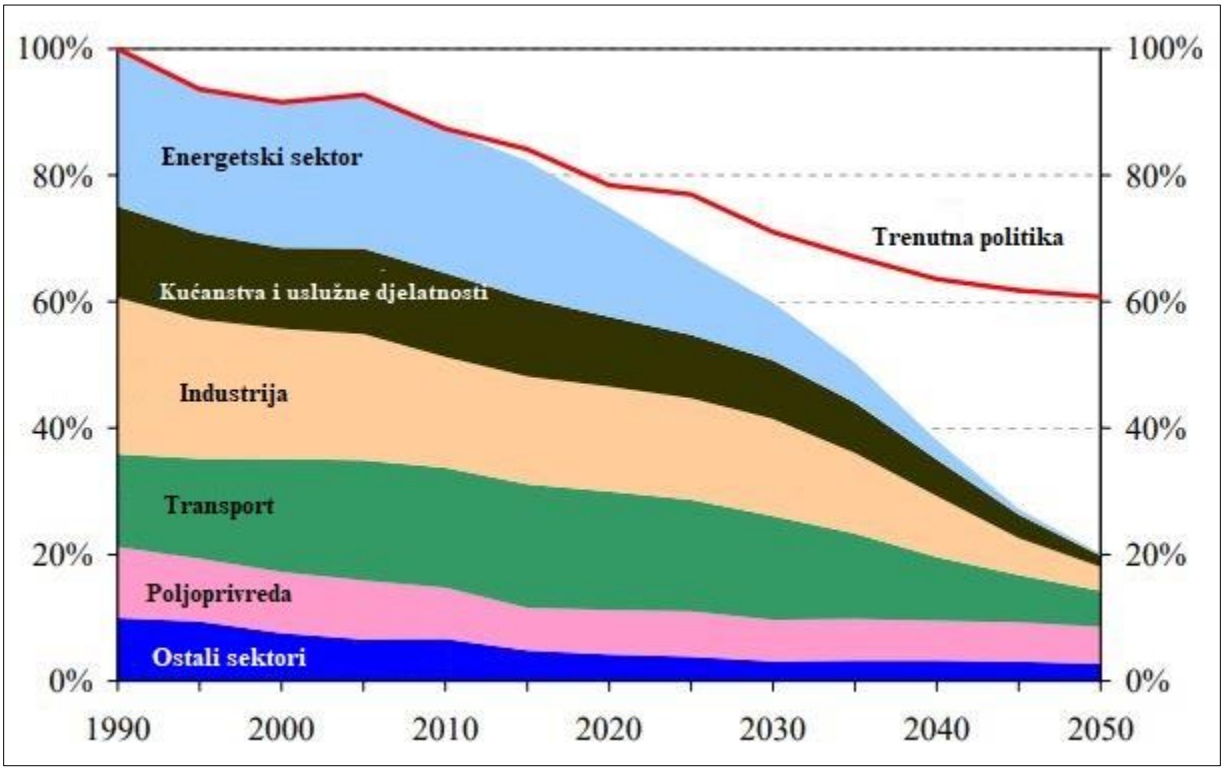
Upravo je na utvrđivanju i povećanju prava potrošača stavljen jedan od naglasaka ovog dokumenta. Potrošačima je potrebno omogućiti veća prava na korištenje energetskih usluga, ponuditi alate za usporedbu cijena energije iz različitih izvora te im omogućiti proizvodnju i prodaju vlastite energije [13].

Također, prepoznata je važnost reorganizacije energetskog tržišta Europske unije koja je potrebna zbog povećanja udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije, distribuirane proizvodnje te potrošača s vlastitom proizvodnjom. Potrebno je omogućiti trgovinu energijom u periodu što kraćem od vremena isporuke te nagrađivati fleksibilnost sa strane proizvođača, potrošača i pohrane energije [14].

2.3. Ciljevi Europske unije do 2050. godine

Iako će Europska unija do 2020. godine ostvariti 20-20-20 ciljeve, pokazuje se da oni nisu dovoljni za sprječavanje klimatskih promjena. Kao što je prikazano na Slici 4., trenutačna politika omogućila bi smanjenje emisije stakleničkih plinova za 40 %, nedovoljno za značajnije promjene.

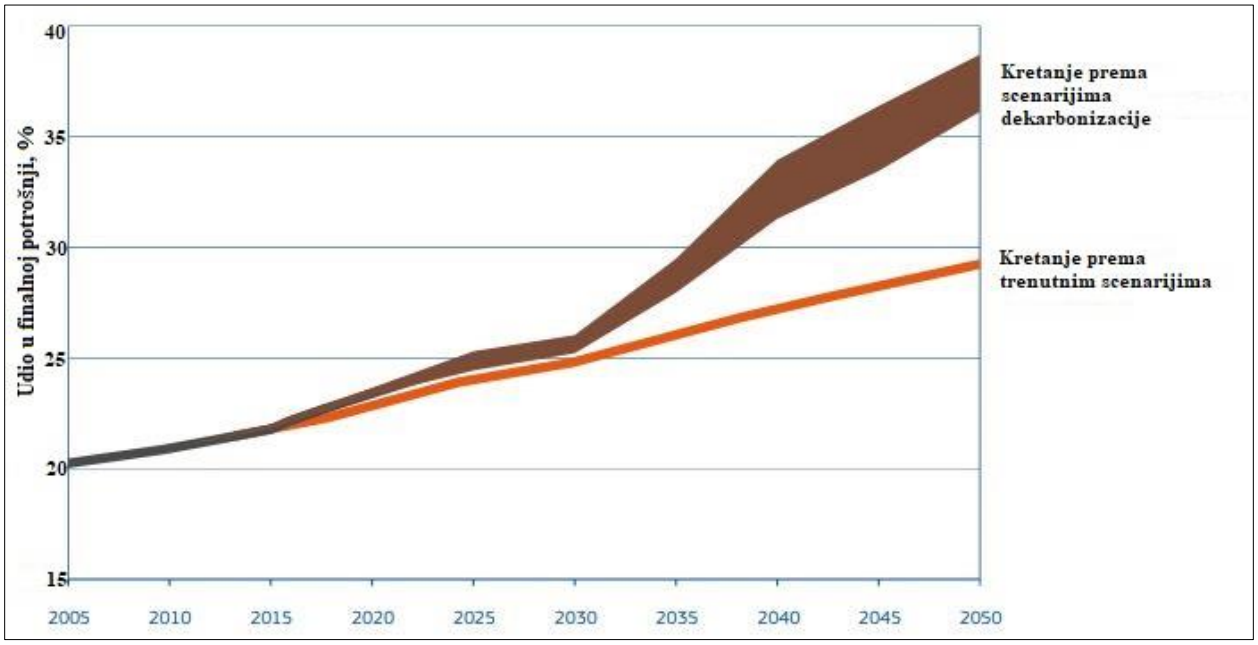
U cilju usporavanja i zaustavljanja rasta globalne temperature ispod 2 ˚C, Europska unija 2011. predstavlja ambiciozan cilj – smanjenje emisije stakleničkih plinova do 2050. godine za 80 – 95 % u odnosu na 1990. godinu. Kako bi se olakšalo praćenje ispunjavanja ciljeva, uvedeni su i međuciljevi: smanjenje emisije CO_2, u odnosu na referentnu 1990. godinu, za 40 % do 2030. godine te 60 % do 2040. godine [15].



Slika 4. Emisija stakleničkih plinova Europske unije do 2050. godine [14]

U dokumentu naziva Energetski plan 2050 (eng. *Energy roadmap 2050*) [15], opisano je 10 strukturalnih promjena koje će doživjeti elektroenergetski sustav. To su:

- Dekarbonizacija
- Veći kapitalni troškovi energetskog sustava i niži troškovi goriva
- Povećanje udjela električne energije u finalnoj potrošnji (Slika 5)
- Rast troškova kućanstava
- Potreba za štednjom energije
- Veliki porast udjela obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji
- Velika uloga komercijalizirane tehnologije izdvajanja i spremanja ugljikovog dioksida (eng. *Carbon Capture and Storage* - CSS) u transformaciji sustava
- Nuklearna energija
- Koordinacija decentralizirane proizvodnje iz obnovljivih izvora s velikim postrojenjima



Slika 5. Udio električne energije u finalnoj potrošnji do 2050. godine [15]

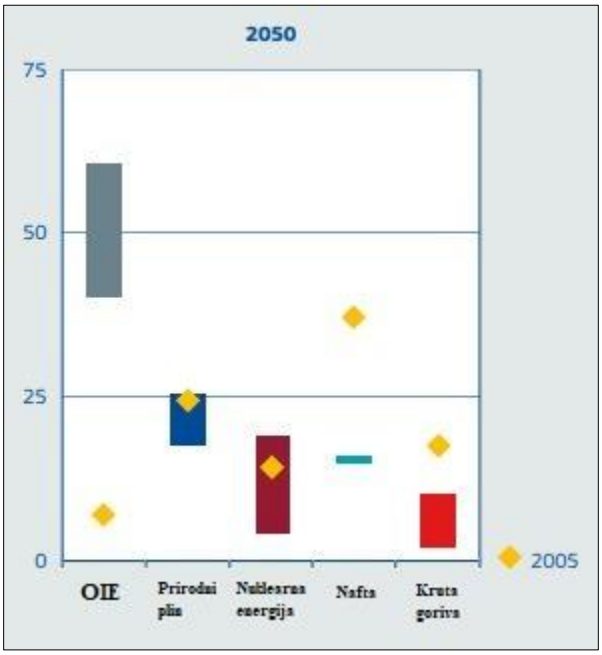
Dekarbonizacija sustava značajna je sa strane uvoza energenata. Kako Europska unija nije bogata prirodnim resursima, dekarbonizacija će dovesti do smanjenja ovisnosti o uvozu energenata na 35 – 45 %, u odnosu na 58 % ako se ništa ne promijeni. Velik broj proizvodnih postrojenja bliži se kraju svog radnog vijeka te će biti potrebne velike investicije u gradnju novih postrojenja, mreža, sustave grijanja i hlađenja, pametna brojila, izolaciju zgrada, električna vozila i dr. S druge strane, smanjena ovisnost o fosilnim gorivima omogućit će nižu cijenu električne energije.

Dekarbonizacijom sektora prometa i zgradarstva (grijanje i hlađenje) doći će do povećanja korištenja električne energije. Predviđa se da će do 2050. godine električna energija pokretati 65 % putničkih i laganih teretnih vozila, a udio električne energije u finalnoj potrošnji 2050. godine iznosit će 36 – 39 % što je dvostruko više nego danas. Cijena električne energije rasti će do 2030. godine ponajviše zbog potrebnih ulaganja u zamjenu dotrajalih postrojenja te pretpostavljenih visokih troškova implementacije velikog broja distribuiranih energetskih izvora u mrežu, dok će nakon 2030. godine cijena stagnirati ili blago padati.

Što se kućanstava tiče, kapitalni troškovi će rasti zbog ugradnja novih, pametnih tehnologija u kućanske uređaje, vozila te obnove zgrada. Ove tehnologije povećat će energetsku efikasnost te time smanjiti troškove energije što će barem dijelom kompenzirati veće troškove ulaganja.

Pretpostavka je da će nuklearna energija 2050. imati udio u finalnoj potrošnji od 18 %, a ako se proizvodnja iz nuklearnih postrojenja zbog sigurnosnih razloga ograniči, važnu ulogu u dekarbonizaciji imat će CSS sustavi zbog mogućnosti skladištenja CO_2 iz konvencionalnih proizvodnih postrojenja.

Udio obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji rasti će s današnjih 10 % na barem 55 % u 2050. godini.



Slika 6. Udio pojedinih energenata u potrošnji primarne energije u 2050. godini te usporedba s 2005. godinom [15]

2.4. Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji

Zakonom o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 100/15, 123/16, 131/17) uređuje se planiranje i poticanje proizvodnje i potrošnje iz postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije. Zakon se temelji na direktivi Europske unije o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora (Direktiva 2009/28/EZ) te direktivi o energetskoj učinkovitosti (Direktiva 2012/27/EU). Poticanjem proizvodnje i potrošnje energije iz obnovljivih izvora ostvaruju se ciljevi Republike Hrvatske propisani Strategijom energetskog razvitka:

1. Povećanje udjela korištenja energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj neposrednoj potrošnji energije u Republici Hrvatskoj
2. Iskorištavanja vlastitih energetskih resursa
3. Smanjenje ovisnosti o uvozu energenata
4. Povećanje energetske učinkovitosti i smanjenje utjecaja fosilnih goriva na okoliš
5. Razvoj poduzetništva i otvaranje novih radnih mjesta vezanih uz energetski sektor
6. Razvoj novih i inovativnih tehnologija
7. Povećanje sigurnosti opskrbe

Potrošači energije s vlastitom proizvodnjom mogu biti pravne ili fizičke osobe (kućanstva, zadruge, industrijski subjekti, organizacije i firme) koji u isto vrijeme proizvode i troše električnu energiju. Opskrbljivači električne energije dužni su preuzimati viškove električne energije krajnjih korisnika s vlastitom proizvodnjom ako oni zadovoljavaju uvjete:

1. Imaju status povlaštenog proizvođača električne energije
2. Imaju pravo na trajno priključenje na elektroenergetsku mrežu
3. Priključna snaga ne prelazi 500 kW
4. Priključna snaga krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom u smjeru isporuke električne energije ne prelazi priključnu snagu kupaca u smjeru preuzimanja električne energije
5. Isporuka električne energije vrši se preko istog obračunskog mjernog mjesta preko kojeg se kupuje električna energija

Status povlaštenog proizvođača električne energije mogu steći fizičke ili pravne osobe, neovisno o snazi postrojenja, koje u proizvodnom pogonu proizvode istovremeno toplinsku i električnu energiju na učinkovit način i/ili koriste obnovljive izvore energije i/ili otpad i obnovljive izvore energije za proizvodnju električne energije. Povlaštenim proizvođačima osigurava se prednost u isporuci električne energije u mrežu u odnosu na druga proizvodna postrojenja. Također, stjecanjem statusa povlaštenog proizvođača ostvaruje se i pravo na poticaje tržišnom premijom i poticaje zajamčenom otkupnom cijenom.

Ako potrošač s vlastitom proizvodnjom zadovoljava gore navedene uvjete potpisuje ugovor o opskrbi krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom. Temeljem ugovora, opskrbljivač u svakom obračunskom razdoblju umanjuje račun krajnjem kupcu za vrijednost isporučene električne

energije. Minimalna vrijednost električne energije preuzete od krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom , C_i, utvrđuje se za obračunsko razdoblje (jedan mjesec) na sljedeći način:

Ako za obračunsko razdoblje vrijedi: $E_{p_i} \geq E_i$,

$$C_i = 0{,}9 * PKC_i \quad \textbf{(1)}$$

ili ako za obračunsko razdoblje vrijedi: $E_{p_i} < E_i$,

$$C_i = 0{,}9 * PKC_i \frac{E_{p_i}}{E_i} \quad \textbf{(2)}$$

gdje je:

E_{p_i} - ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca unutar obračunskog razdoblja i, izražena u kn/kWh

E_i - ukupna električna energija isporučena u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca, unutar obračunskog razdoblja i, izražena u kn/kWh

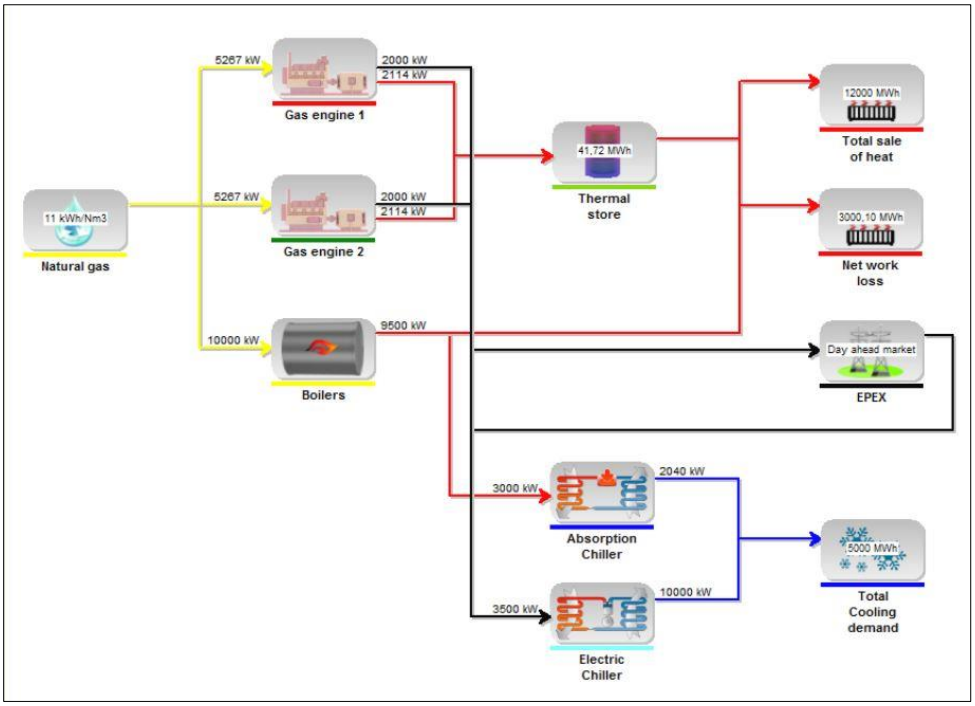
PKC_i - prosječna jedinična cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja i, izražena u kn/kWh [16].

3. METODA

U ovome poglavlju bit će opisani računalni alati koji su korišteni prilikom modeliranja, način njihovog rada i ulazni podatci neophodni za izradu ovog rada.

3.1. EnergyPRO

EnergyPRO je računalni paket kojeg je razvio Henrik Lund 80-ih godina 20. stoljeća u suradnji s EMD International A/S, danskom programerskom i konzultantskom tvrtkom specijaliziranom za područje planiranja, vođenja i dokumentiranja projekata koji nisu štetni po okoliš [17].

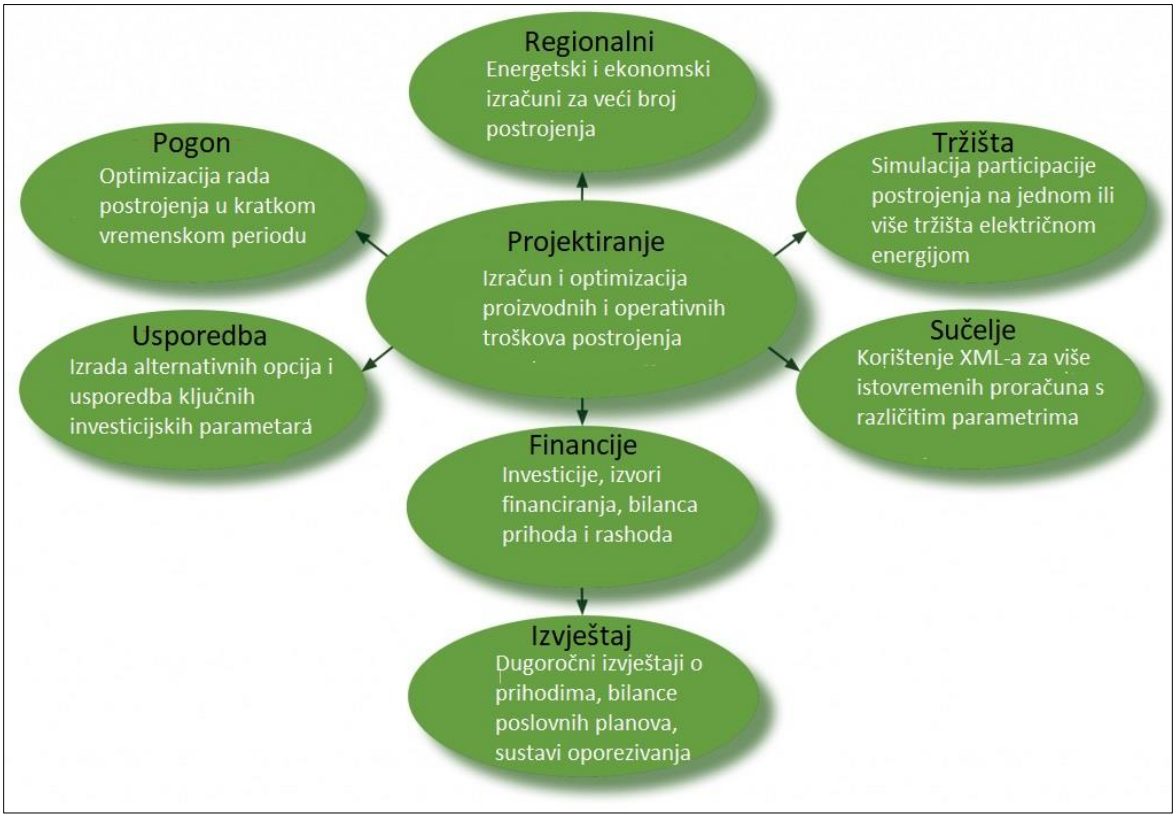


Slika 7. Primjer modela izrađenog alatom EnergyPRO [17]

EnergyPRO se koristi za kombiniranu tehno-ekonomsku analizu i optimizaciju kompleksnih energetskih projekata. Omogućuje modeliranje projekata kao što su kogeneracije za centralizirane toplinske sustave , industrijske kogeneracije, trigeneracije. Također, moguće je modelirati i tehnologije koje se koriste za iskorištavanje potencijala obnovljivih izvora energije, kao što su geotermalna postrojenja, bioplinska postrojenja, solarni kolektori, fotonaponske ćelije, vjetroagregati i dr. te njihovu kombinaciju s toplinskim spremnicima, baterijama, električnim automobilima i drugim oblicima pohrane energije. Dodatno k tome, EnergyPRO se koristi i za izračun emisije stakleničkih plinova (CO_2, NO_x, SO_2 i dr.) koje navedene tehnologije proizvode

[17] . Baziran je na modularnoj strukturi koja omogućuje različite vrste analiza. U sklopu paketa nalazi se sedam modula. Cijena paketa varira u ovisnosti o izabranim modelima te se kreće između 2700 € i 5600 € [18]. Dostupni moduli su:

- Projektiranje (eng. *Design*)
- Pogon (eng. *Operation*)
- Regionalni (eng. *Region*)
- Usporedba (eng. *Compare*)
- Tržišta (eng. *Markets*)
- Sučelje (eng. *Interface*)
- Financije (eng. *Finance*)
- Izvještaj (eng. *Accounts*)

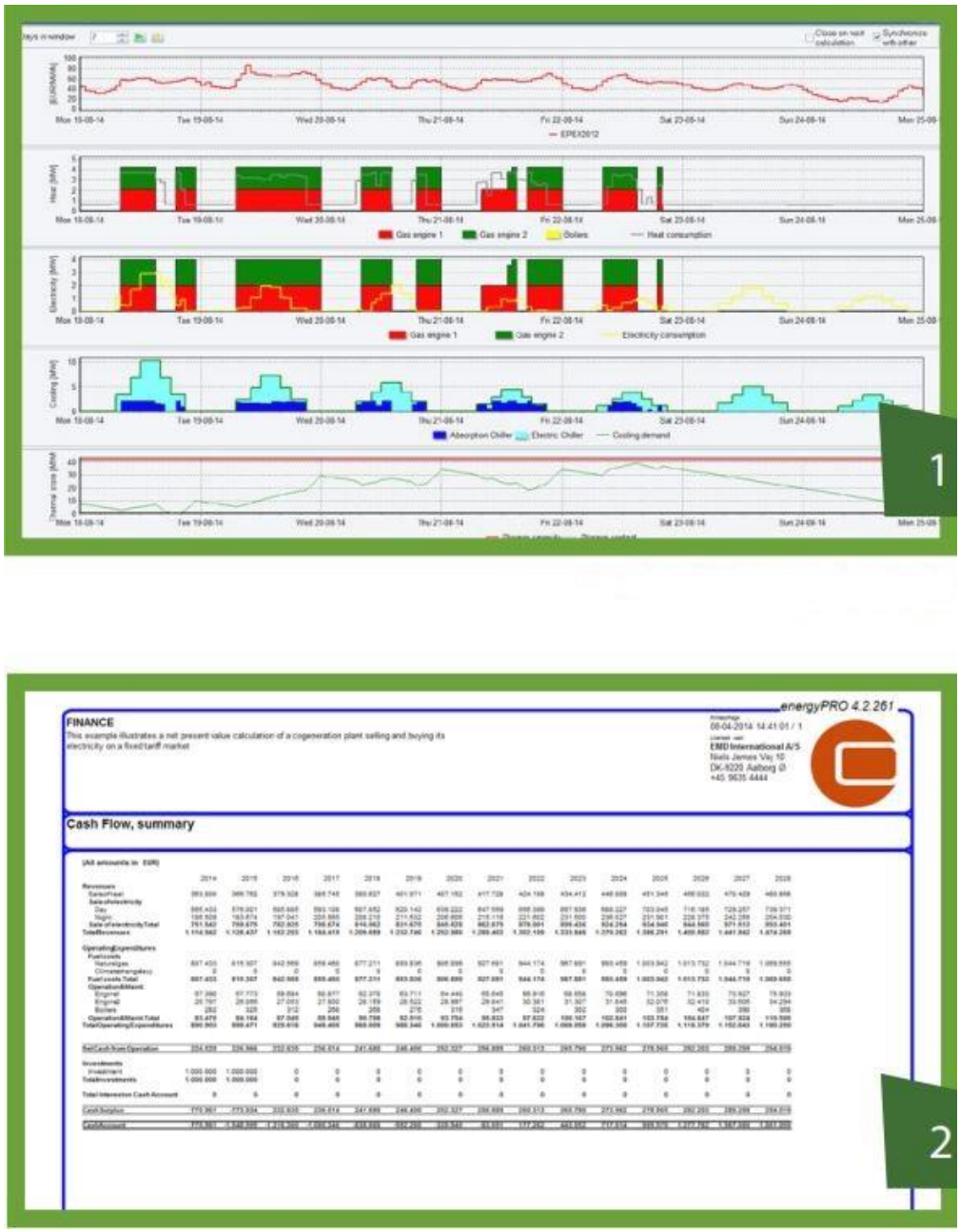


Slika 8. Moduli u EnergyPRO alatu [17]

Design modul osnovni je modul, a koristi se za izračun optimalne proizvodnje toplinske, rashladne i električne energije u periodu od jedne godine te prikaz osnovnih ekonomskih

parametara. Također, omogućuje analizu raznih vrsta toplinskih spremnika i spremnika goriva te njihov utjecaj na rad kogeneracijskih i trigeneracijskih postrojenja. *Finance* modul donosi prošireni set energetskih i ekonomskih proračuna tijekom cijelog životnog vijeka postrojenja. Taj set uključuje uzimanje u obzir investicija, izvora financiranja, bilancu prihoda i rashoda te promjene cijena energije i energenata tijekom godina. *Accounts* modul donosi dodatno proširenje na ekonomskom polju. To uključuje dugoročne izvještaje o prihodima, bilance poslovnih planova te sustav poreza. *Operation* modul koristi se za optimizaciju rada energetskih postrojenja u kraćem periodu, običnu u razdoblju od jednog dana do nekoliko tjedana. *Region* modul koristi se za energetske i ekonomske proračune postrojenja neke regije koja se ne nalaze na istoj geografskoj lokaciji. Analiza i optimizacija kogeneracijskih postrojenja prilikom istovremenog sudjelovanja na različitim energetskim tržištima (npr. dan unaprijed tržište, tržište rezerva, tržište uravnoteženja, tržište fiksnih tarifa) moguća je u modulu naziva *Markets*. *Interface* modul daje mogućnost istovremene promjene određenih parametara bez potrebe za mijenjanjem tih parametara u svakom od pojedinačnih dokumenata dok *Compare* modul omogućuje nadograđivanje glavnog projekta alternativnim scenarijima te usporedbu ključnih investicijskih parametara za svaku od opcija [17].

EnergyPRO temelji se na definiranju i analizi ulaznih i izlaznih parametara (eng. *input/output*) za izračun godišnje proizvodnje u vremenskim koracima od jednog sata. On je deterministički, što znači da za jednake vrijednosti ulaznih parametara, svaki puta dobivamo jednake izlazne parametre. Ulazni parametri su kapaciteti (električni i toplinski) postrojenja, efikasnost, satne distribucijske krivulje toplinskih potreba, potreba za električnom energijom i cijene električne energije. Izlazni parametri su proizvodnja toplinske i električne energije, uvoz i izvoz energije, troškovi, emisije CO_2, SO_2, NO_x i dr.



Slika 9. Prikaz *Design* (gore) i *Finance* (dolje) modula [17]

Način rada EnergyPRO-a takav je da umjesto proračuna proizvodnje energije kronološkim redom, alat proizvodnju računa prema najpovoljnijim razdobljima u godini, što je definirano u strategiji vođenja (eng. *Operating strategy*). Strategiju vođenja definira korisnik ili se automatski računa na temelju prioriteta pojedinih proizvodnih postrojenja.

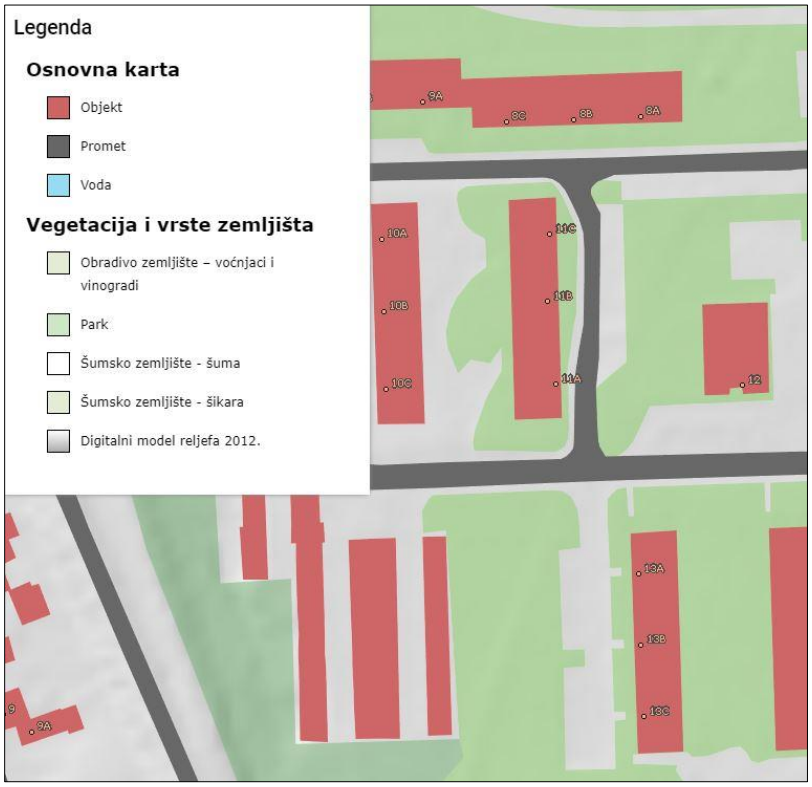
Primjer nekronološkog načina rada prikazuje Slika 10. Brojevi u stupcima predstavljaju proizvodne cijene za pojedini sat. U cilju smanjenja troškova, EnergyPRO najprije odabire postrojenje i sat u kojem je proizvodna cijena najmanja. U ovome slučaju to je Postrojenje 1 u 354. satu. Sljedeći odabir je Postrojenje 2 u 351. satu, a nakon njega Postrojenje 1 u 353. satu. Takav proces ponavlja se dok se ne zadovolje potrebe ili ne iscrpe proizvodne mogućnosti U izračun se osim cijene, uključuju i tehnička ograničenja postrojenja (vrijeme pokretanja, minimalno vrijeme rada, minimalno moguće opterećenje), ali i dostupnost goriva, napunjenost toplinskog spremnika i dr.

Sat	**351**	**352**	**353**	**354**	**355**
Postrojenje 1	200	150	70	40	120
Postrojenje 2	50	90	140	160	120
Postrojenje 3	80	80	80	80	80

Slika 10. Primjer nekronološkog proračuna [19]

3.2. Geoportali

Geoportali su internetske stranice na kojima je moguće pristupiti raznim prostornim i demografskim informacijama država ili pojedinih gradova kao što su: katastarski plan, registar prostornih jedinica, statistički podatci o stanovništvu, vrsta i namjena zemljišta i dr.



Slika 11. Mjerenje površina preko geoportala [20]

Geoportali sadrže i alate koji omogućuju mjerenje površina što je potrebno uraditi u sklopu ovog rada. Podatke o dostupnim krovnim površinama moguće je prikupiti mjerenjem svake zgrade na traženom području.

Zbog raznih uređaja postavljenih na krovove zgrada poput antena i klima uređaja, za postavljanje solarnih kolektora ili fotonaponskih ćelija nije moguće upotrijebiti cijelu krovnu površinu zgrade. Postotak krovnih površina pogodnih za njihovo postavljanje kreće se u rasponu od 6,5 do 59 % ukupne površine [21].

3.3. Određivanje toplinskih potreba

Toplinske potrebe kućanstva mogu se podijeliti na potrebe za grijanjem potrošne tople vode i potrebe za grijanjem prostora. Za potrebe rada u programu EnergyPRO potrebno je izraditi satne distribucijske krivulje toplinskih opterećenja. Krivulje se u program unose u obliku tablice u kojoj je svakom satu u godini pridodana točna vrijednost opterećenja u danom satu, za razliku od programa poput EnergyPLAN, gdje su brojke relativne.

3.3.1. Potrošna topla voda (PTV)

Potrošna topla voda je voda koja se koristi kod svih vrsta objekata za zadovoljavanje potreba kao što su sanitarne i higijenske potrebe, voda za piće, pripremu hrane, pranje rublja, ali se ne koristi za grijanje prostora. Potreba za njom postoji tijekom cijele godine, ali potrošnja značajno varira iz sata u sat. Slika 12. prikazuje satnu potrebu za toplom vodom prosječnog kućanstva koja varira od 0,4 % dnevne potrošnje u četiri sata, pa sve do 9,2 % u osam sati.



Slika 12. Satna potrošnja PTV-a prosječnog kućanstva [% ukupne potrošnje] [22]

3.3.2. Grijanje

Proračun potrebne toplinske energije za grijanje prostora temelji se na jednostavnoj stupanj-sat metodi. Najprije je potrebno unijeti referentnu temperaturu, T. Akoj je temperatura zraka u bilo kojem satu veća od T, prema jednadžbi (3), potrebna toplinska energija za grijanje u tom satu je nula. Kad se vrijednost temperature zraka u nekom satu spusti ispod referentne temperature, T, prema jednadžbi (3), potrebna toplinska energija za grijanje poprima vrijednost veću od nule. Također, moguće je odrediti sezonu grijanja definirajući datume početka, odnosno kraja sezone grijanja.

Satna distribucijska krivulja temperature zraka okoliša predstavlja prosječnu temperaturu vanjskog zraka za svaki sat tijekom godine na određenoj lokaciji. Ove krivulje moguće je pronaći na stranicama meteoroloških istraživačkih centara, a izvori prikupljanja podataka su: površinske meteorološke postaje, meteorološki baloni, zračne luke, komercijalni zrakoplovi, sateliti i dr. Satna distribucijska krivulja temperature okoliša dostupna je i u sklopu EnergyPRO računalnog alata.

Formula za izračun potrebne topline daje linearnu zavisnost između temperature okoliša i energije za grijanje:

$$Q_{H,i} = a \cdot \max(T - T_{a,i}; 0) \quad \textbf{(3)}$$

gdje je:

$Q_{H,\,i}$ – toplinska snaga za grijanje prostora u i-tom satu [W]

a – konstanta, prikazuje potrebnu toplinsku snagu za jedan stupanj razlike između referentne i okolišne temperature [W/˚C]

T – referentna temperatura [˚C]

$T_{a,\,i}$ – prosječna temperatura zraka okoliša u i-tom satu [˚C]

Ukupno toplinsko opterećenje dobiva se zbrajanjem svih satnih vrijednosti tijekom godine:

$$Q_H = \sum_{i=1}^{8760} Q_{Hi} \quad \textbf{(4)}$$

gdje je:

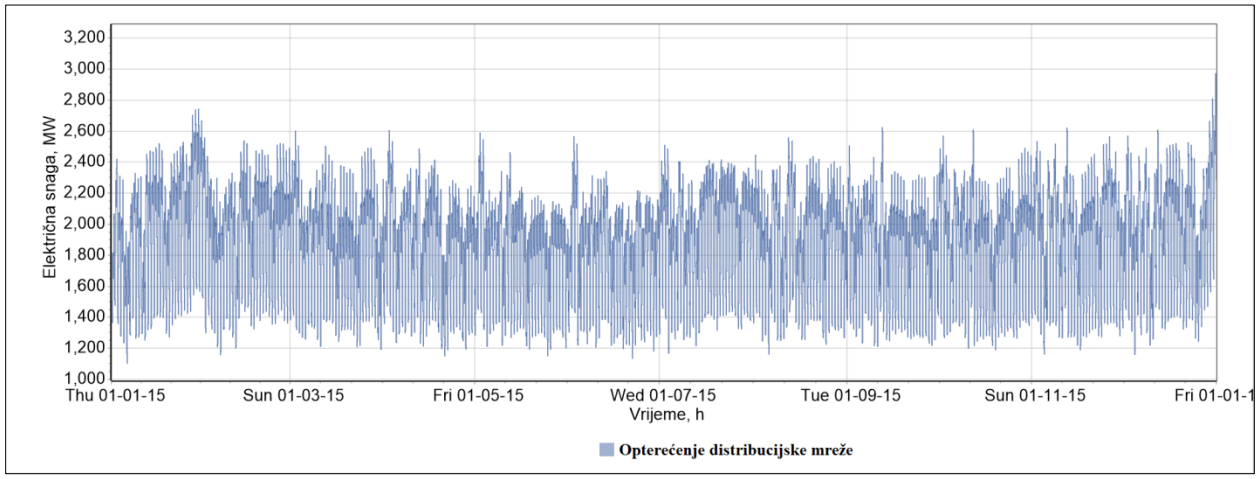
Q_H – ukupno toplinsko opterećenje tijekom godine [Wh]

3.4. Određivanje potreba za električnom energijom

Određivanje ukupnih potreba za električnom energijom nekog naselja temelji se na poznavanju satne distribucijske krivulje potrebne električne snage te gubitaka distribucijske mreže. Ove podatke moguće je pronaći na stranicama operatora prijenosnog sustava električne energije.

Operator prijenosnog sustava obavlja djelatnosti organiziranja tržišta električnom energijom, vođenje i evidentiranje subjekata i njihovih obveza na tržištu, izradu tržišnog plana za dan unaprijed, obračun energije uravnoteženja te analizu i unapređenje sustava [23].

Primjer satne krivulje potrošnje električne energije prikazuje Slika 13.

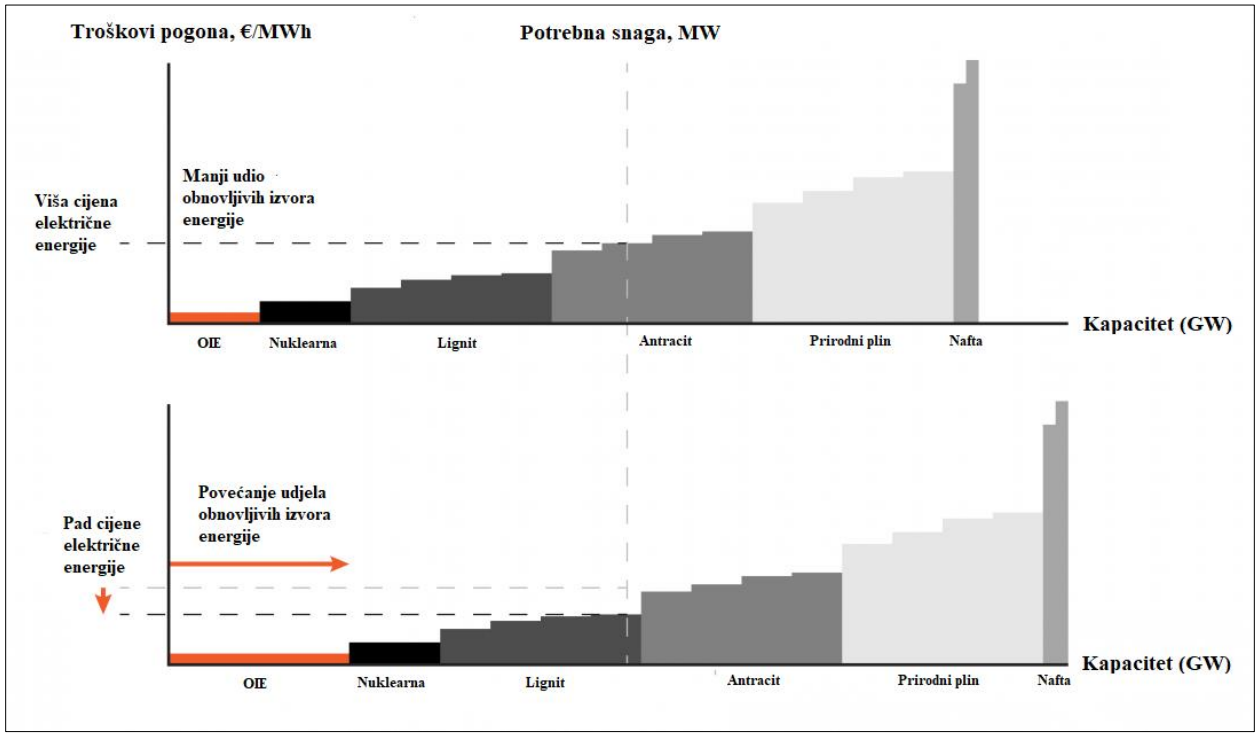


Slika 13. Satna krivulja potrošnje električne energije Hrvatske

3.5. Tržište električnom energijom

Električna energija u mnogočemu je specifičan proizvod na tržištu. Specifičnom je čine ograničene mogućnosti njene pohrane te stalne promjene potrebnih i dostupnih količina. S ekonomskog gledišta električna energija, kao i svaka druga roba, može se kupovati, prodavati ili mijenjati. To se odvija na tržištu električne energije.

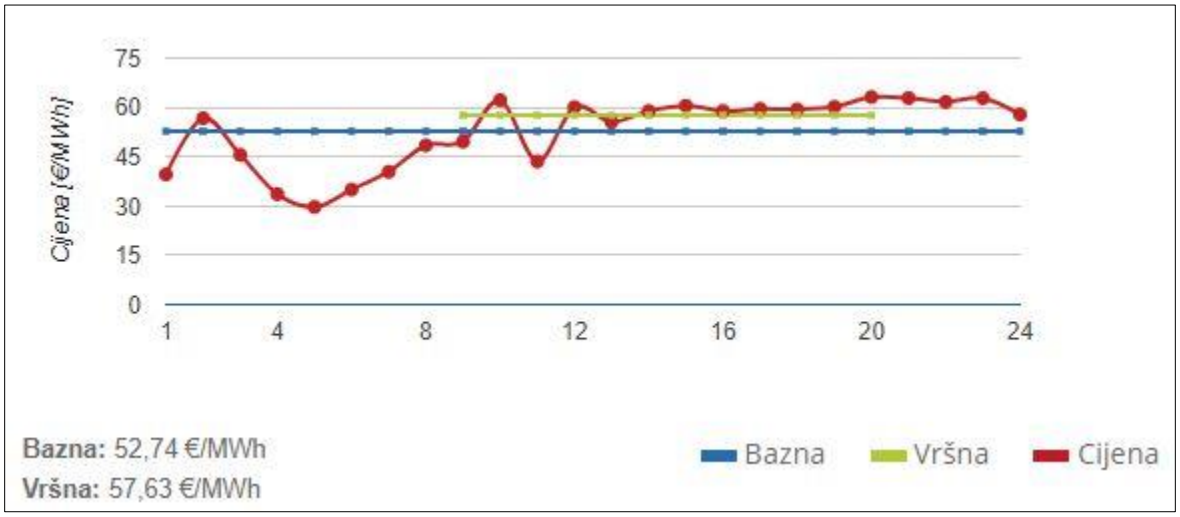
Tržište električne energije predstavlja sustav koji omogućuje kupnju električne energije putem licitiranja, njenu prodaju davanjem ponuda. Cijena trgovanja određuje se načelom ponude i potražnje, što je ponuda manja, a potražnja veća, cijena raste i obrnuto. Trgovanje je moguće putem kratkoročnih i dugoročnih ugovora. Postrojenja koja nude proizvodnju električne energije rangiraju se prema marginalnoj cijeni proizvodnje energije. Takav način rangiranja proizvodnih postrojenja naziva se red pokretanja (eng. *merit order*). Oni s nižim varijabilnim troškovima proizvodnje imaju prioritet pri proizvodnji od onih s visokim varijabilnim troškovima.



Slika 14. Ilustracija *merit ordera* [24]

Obnovljivi izvori energije zbog svojih niskih marginalnih troškova utječu na smanjenje prosječne cijene električne energije. Sustavom poticaja njihova cijena na tržištu postaje niža od cijene konvencionalnih postrojenja na ugljen ili prirodni plin čime imaju prioritet u proizvodnji. Također, maksimum proizvodnje obnovljivih izvora energije podudara se s dnevnim maksimumom potražnje (eng. *peak load*) čime se smanjuje potražnja za vršnom energijom (eng. *peak electricity load*) što dodatno ruši cijenu električne energije.

Obračunska jedinica na tržištima električnom energijom efektivna je vrijednost snage koja se mjeri u intervalima od 5, 15 ili 60 minuta, dok se potražnja za električnom energijom mjeri u snazi ili u energiji. Snaga je neto brzina prijenosa električne energije u nekom trenutku i mjeri se u megavatima (MW). Energija je električna energija koja prolazi kroz mjerno mjesto u nekom vremenskom periodu i mjeri se u megavat satima (MWh).



Slika 15. Kretanje cijena na dan unaprijed tržištu, CROPEX [25]

3.6. Proizvodni sustavi

Program EnergyPRO dijeli proizvodne sustave na one definirane:

- Krivuljom snage (eng. *Power curve*)
- Individualnim parametrima

Krivuljom snage definirani su:

- Kotlovi
- Električni bojleri
- Kogeneracijska postrojenja
- Električne dizalice topline
- Apsorpcijski hladnjaci
- Električni hladnjaci

Krivulja snage sadrži vrijednosti o potrošnji goriva, električnoj i toplinskoj snazi, odnosno, prikazuje efikasnost postrojenja za različita opterećenja.

Individualnim parametrima definirani su obnovljivi izvori energije, a to su:

- Vjetroturbine
- Solarni kolektori s ravnim pločama
- Vakuumski solarni kolektori

- Fotonaponske ćelije

U nastavku su opisani proizvodni sustavi korišteni u ovome radu, njihov princip rada te ključni parametri koji ih opisuju.

3.6.1. Kogeneracijska postrojenja

Kogeneracijska postrojenja (*eng. Combined Heat and Power, CHP*) istodobno proizvode korisnu toplinsku i električnu energiju. Toplinska energija obično se koristi za grijanje pojedinih objekata, naselja, gradskih kvartova ili u industrijskim procesima. Kao gorivo, kogeneracijska postrojenja, ovisno o svojoj izvedbi, mogu koristiti prirodni plin, loživo ulje i dr., ali i obnovljive izvore poput biomase.

Kako sva postrojenja s vremena na vrijeme moraju obustaviti proizvodnju zbog popravaka i zamjene dotrajalih dijelova (remont), potrebno je definirati taj period godine. Taj period je obično ljeti zbog malih toplinskih potreba. Također, postoje i tehnička ograničenja u pogledu minimalnog vremena rada i vremena potrebnog za pokretanje (eng. *starting up period*) i gašenje postrojenja (eng. *shutting down period*).

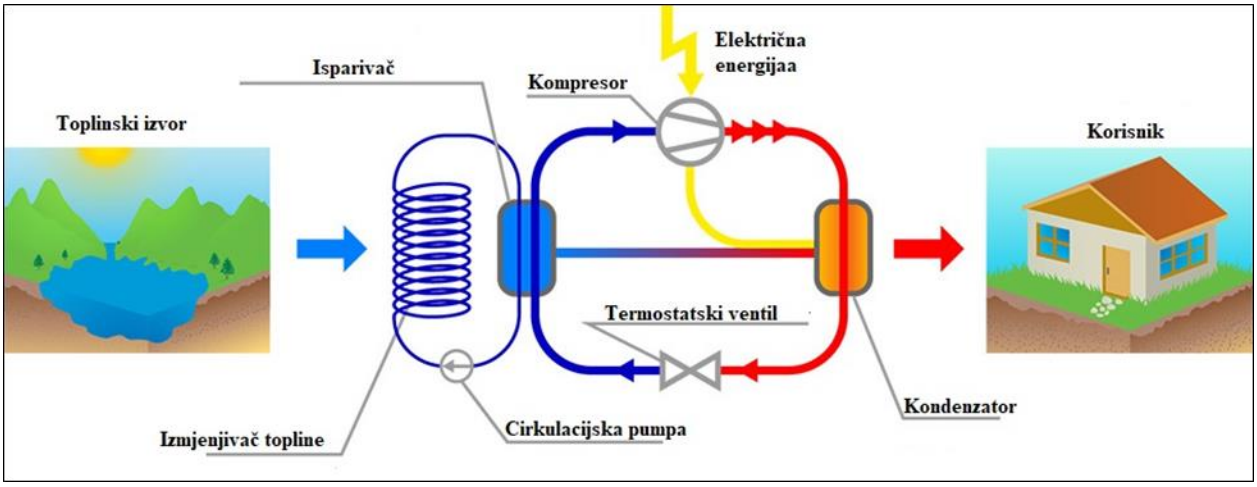
Parametri koji opisuju kogeneracijsko postrojenje su sljedeći:

- Omjer električne i toplinske snage (eng. *Power to heat ratio*) – predstavlja omjer maksimalne toplinske i električne snage kogeneracije
- η_{el} – električna učinkovitost
- η_{to} – toplinska učinkovitost
- P_{el} – Maksimalna električna snaga [MW]
- P_{to} – Maksimalna toplinska snaga [MW]

3.6.2. Električna dizalica topline

Dizalice topline uređaji su koji prenose toplinsku energiju iz sustava niže temperature na sustav više temperature uz dodatan utrošak rada. Sustav niže temperature predstavljaju voda, zrak ili zemlja koji se koriste kao izvor toplinske energije odnosno za zagrijavanje radnog medija za koje su specifične niske temperature isparavanja pri atmosferskom tlaku, kao što su freoni R 407C, R 404A i dr. Radni medij se zagrijava do temperature isparavanja, isparava te se blago pregrijan vodi u kompresor u kojem mu se podiže tlak, na račun utrošenog rada. S obzirom na to kako porast tlaka rezultira višom temperaturom isparavanja odnosno kondenzacije, radni medij može

prenijeti toplinsku energiju sustavu više temperature kao što je voda koja se koristi u centraliziranom toplinskom sustavu. Radni medij prilikom predaje toplinske energije kondenzira te se vodi u prigušni ventil gdje mu se tlak smanjuje na početni iznos, čime se završava kružni proces. Ovaj proces grafički prikazuje Slika 16.



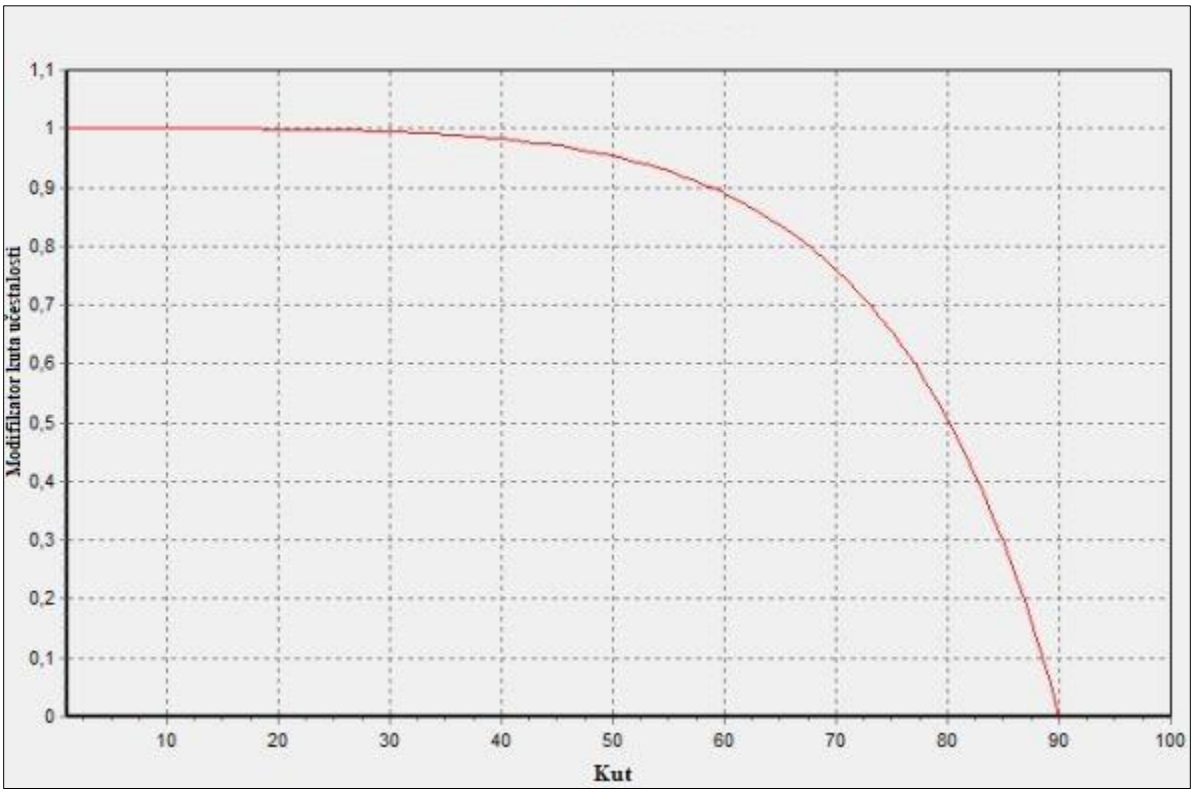
Slika 16. Shema rada električne dizalice topline [26]

Omjer toplinske energije predane prilikom kondenzacije radnog medija i utrošene električne energije definira se kao koeficijent učinkovitosti u grijanju (eng. *coefficient of performance,COP*). Niže temperature isparavanja radnog medija odnosno niže temperature toplinskog izvora (tla, vode, zraka) rezultiraju većim utroškom električne energije za rad kompresora, a samim time i nižim COP-om. Promjena temperature toplinskog izvora rezultira promjenom COP-a, koja je time manje što je temperatura toplinskog izvora konstantnija.

3.6.3. Pločasti solarni kolektori

Pločasti solarni kolektori najčešći su uređaji za pretvorbu energije sunca u toplinsku energiju radnog medija. Kao radni medij najčešće se koristi voda, ali mogu i druge radne tvari kao što su glikol i antifriz. Namjena im je u većini slučajeva zagrijavanje potrošne tople vode, ali mogu biti korišteni i za dogrijavanje centralnog sustava grijanja te grijanje bazena. Količina proizvedene toplinske energije solarnih kolektora ovisi o intenzitetu sunčevog zračenja i temperaturi okoliša, ali i o orijentaciji i kutu nagiba kolektora. Odabir kuta nagiba vrši se prema periodu godine kada je najpotrebnija toplinska energija.

Kako bi se moglo odrediti veličinu polja kolektora i njihovu poziciju nužno je imati podatke o dostupnoj površini za njihovo postavljanje. Zbog raznih uređaja postavljenih na krovove kuća i zgrada poput antena i klima uređaja, za postavljanje solarnih kolektora nije moguće upotrijebiti cijelu krovnu površinu zgrade.



Slika 17. Vrijednosti modifikatora kuta učestalosti [27]

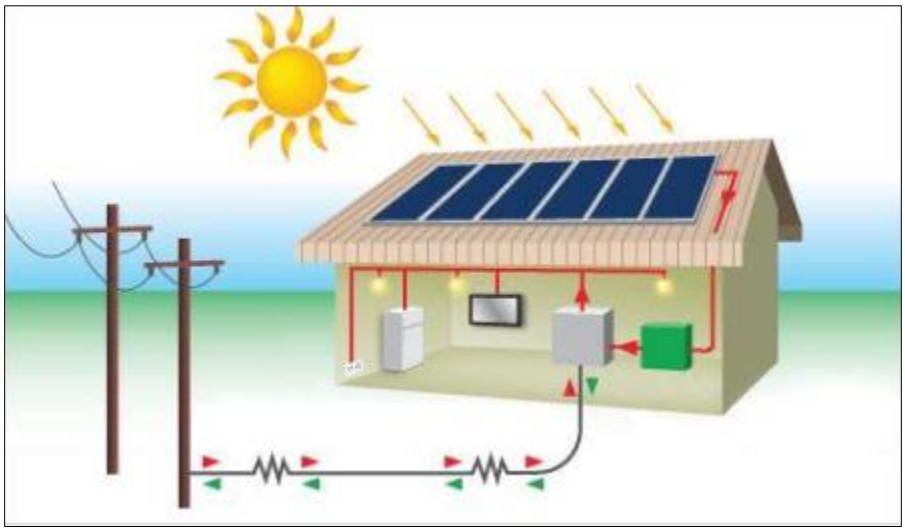
Postoje razne izvedbe pločastih solarnih kolektora, a njihova učinkovitost definira se s nekoliko ključnih koeficijenata. Ti koeficijenti su:

- η_a – konverzijski faktor, vrijednost definirana za stanje kada je temperatura okoliša jednaka temperaturi radnog medija u kolektorima
- a_1 – koeficijent gubitka [W/m^2K]
- a_2 - koeficijent gubitka [W/m^2K]
- K^{Θ} - modifikator kuta učestalosti, definira promjene učinka kolektora u ovisnosti o promjeni kuta sunčevog zračenja na plohu kolektora (Slika 17)

3.6.4. Fotonaponske ćelije

Osim pretvorbe sunčeve energije u toplinsku, moguća je njena pretvorba i u električnu energiju. To se postiže fotonaponskim ćelijama. Fotonaponske ćelije su poluvodiči, većinom izrađeni od silicija, u kojima se pod utjecajem svjetlosti na krajevima poluvodiča generira napon te solarna ćelija postaje izvor istosmjerne struje. Ta je pojava poznata i kao fotonaponski efekt. Ćelije je moguće međusobno povezati u serijski ili paralelni spoj tvoreći tako module koji mogu proizvesti istosmjernu struju s naponom od 12 ili 24 V.

Kao i kod solarnih kolektora, i kod fotonaponskih ćelija količina proizvedene električne energije ovisi o intenzitetu sunčevog zračenja, temperaturi okoliša te o orijentaciji i kutu nagiba kolektora. Proizvedena električna energija kod manjih se sustava koristi primarno za pokrivanje vlastitih potreba, dok se višak prodaje u mrežu što prikazuje Slika 18.



Slika 18. Shema malog fotonaponskog sustava [23]

Sposobnost solarne ćelije da generira električnu energiju određena je sljedećim parametrima:

- P_{max} – maksimalna snaga modula [W]
- k_{Pmax} – temperaturni koeficijent snage [%/˚C]
- NOCT – normalna radna temperatura ćelije (eng. *normal operating cell temperature, NOCT*) [˚C]

3.6.5. Toplinski spremnici

Intermitentnost obnovljivih izvora energije znači njihovu dostupnost u određenim periodima dana, npr. proizvodnja električne energije iz fotonaponskih panela danju, dok u ostalim periodima nisu dostupni ili je njihova proizvodnja suviše mala da bi zadovoljili potrebe. Zbog toga, u potpunoj integraciji obnovljivih izvora energije, ključnu ulogu imaju spremnici energije, a u slučaju ovog rada spremnici toplinske energije.

Brojne su prednosti spremnika topline. Smanjuju vršno opterećenje sustava, daju mogućnost pohrane energije u trenucima jeftine proizvodnje toplinske energije te prodaju u trenucima kada je proizvodnja skupa, povećavaju efikasnost sustava te se mogu povezati s obnovljivim izvorima topline. Nedostaci su izmjena topline s okolišem i visoki investicijski troškovi [28].

Najčešći medij u toplinskim spremnicima je voda zbog visoke toplinske vodljivosti, rasprostranjenosti i netoksičnosti. Prema konstrukciji, spremnici se dijele na nadzemne i podzemne. Podzemni spremnici skuplji su zbog troškova ukopavanja, ali imaju mogućnost pohrane topline u razdoblju od nekoliko sati pa do nekoliko mjeseci [28].

Zavisno o toplinskom kapacitetu spremnika topline te vremenskom periodu punjenja i pražnjenja istih, moguće ih je podijeliti na spremnike s kratkotrajnom i spremnike s dugotrajnom pohranom toplinske energije. Spremnici s kratkotrajnom pohranom toplinske energije se koriste u stambenim zgradama i kućanstvima te se pune i prazne u vremenskom periodu od nekoliko dana, čime doprinose smanjenju dnevnih vršnih potreba za toplinskom energijom. S druge pak strane, spremnici s dugotrajnom pohranom odnosno sezonski spremnici se koriste za dugoročnije skladištenje toplinske energije, a svoju primjenu nalaze kod većih sustava, kao što su centralizirani toplinski sustavi. Korištenje toplinske energije skladištene u ovakvoj vrsti spremnika doprinosi smanjenju godišnjih vršnih toplinskih potreba te kontinuiranoj proizvodnji toplinske energije, što je posebice važno za veće sustave većih snaga proizvodnje toplinske energije.

Toplinski gubici spremnika definirani su jednadžbom (5) i iznose:

$$Q_{gub,spr} = \frac{\frac{1000 \cdot \lambda \cdot \pi}{s} \cdot \sqrt{\frac{V}{h \cdot \pi}} \cdot \left(2 \cdot h + \sqrt{\frac{V}{h \cdot \pi}}\right) \cdot (T_{spr,i} - T_{a,i})}{10^6} \quad \textbf{(5)}$$

gdje je:

$Q_{gub,\ spr}$ – toplinski gubici spremnika [MW]

λ – koeficijent toplinske provodljivosti [W/m°C]

s – debljina stijenke spremnika [mm]

V – volumen spremnika [m^3]

h – visina spremnika [m]

$T_{spr,\ i}$ – temperatura unutar spremnika u i-tom satu [°C]

$T_{a,\ i}$ – vanjska temperatura zraka u i-tom satu [°C]

3.7. Izračun ekonomskih pokazatelja

Ocjena isplativosti pojedinih scenarija i njihova međusobna usporedba moguća je na temelju izračunatog godišnjeg troška za svaki od scenarija odnosno svake od tehnologija korištenih za proizvodnju toplinske i električne energije. Rashodi koji se javljaju pri proizvodnji i potrošnji električne te toplinske energije dijele se na :

- Investicijski trošak
- Fiksni godišnji trošak održavanja
- Varijabilni godišnji trošak održavanja
- Trošak goriva
- Trošak otkupljene električne energije
- Trošak otkupljene toplinske energije

S druge pak strane, toplinska i električna energija predana u mrežu smatra se prihodom te smanjuje ukupni godišnji trošak. Ukupni godišnji trošak moguće je izračunati prema formuli (6):

$$AC_a = \sum_i CC_{i,a} + \sum_i FO\&M_{i,a} + \sum_i VO\&M_{i,a} + \sum_i FC_{i,a} + C_{el,a} + C_{h,a} - (S_{el,a} + S_{h,a}) \quad \textbf{(6)}$$

Gdje je

AC_a- ukupni godišnji trošak proizvodnje i potrošnje električne i toplinske energije [kn]

$CC_{a,i}$-godišnji investicijski trošak proizvodne jedinice *i* [kn]

$FO\&M_{i,a}$- godišnji fiksni trošak održavanja proizvodne jedinice *i* [kn]

$VO\&M_{i,a}$- godišnji varijabilni trošak održavanja proizvodne jedinice *i* [kn]

$FC_{i,a}$-godišnji trošak goriva proizvodne jedinice *i* [kn]

$C_{el,a}$- godišnji trošak električne energije otkupljene iz mreže [kn]

$C_{h,a}$- godišnji trošak toplinske energije otkupljene iz mreže [kn]

$S_{el,a}$- godišnji prihod ostvaren prodajom električne energije [kn]

$S_{H,a}$- godišnji prihod ostvaren prodajom toplinske energije [kn]

Godišnji investicijski trošak proizvodne jedinice *i*, $CC_{a,i}$, računa se pomoću jednadžbe (7).

$$CC_{a,i} = IC_i \cdot CRF_i \cdot P_i \quad \textbf{(7)}$$

gdje je:

IC_i- investicijski trošak proizvodne jedinice *i* [kn/MW]

P_i - instalirana snaga proizvodne jedinice *i* [MW]

CRF -faktora povrata kapitala (eng. *capital recovery factor*) [-], računa se prema jednadžbi **(8**) [29].

$$CRF = \frac{D \cdot (1+r)^N}{(1+D)^N - 1} \quad \textbf{(8)}$$

D- diskontna stopa [%]

N- životni vijek postrojenja [-]

Godišnji fiksni trošak održavanja proizvodne jedinice *i*, $FO\&M_{i,a}$, računa se pomoću jednadžbe (9)

$$FO\&M_{i,a} = FO\&M_i \cdot P_i \quad \textbf{(9)}$$

gdje je:

$FO\&M_i$- fiksni trošak održavanja proizvodne jedinice *i* [kn/MW]

Godišnji varijabilni trošak proizvodne jedinice *i*, $VO\&M_{i,a}$, računa se pomoću jednadžbe (10):

$$VO\&M_{i,a}=VO\&M_i \cdot\ 8760\ h \cdot CF \cdot P_i \quad \textbf{(10)}$$

Gdje je:

$VO\&M_i$- varijabilni trošak proizvodnje energije proizvodne jedinice *i* [kn/MWh]

CF-faktor opterećenja, postotak vremena u kojem proizvodna jedinice radi pri punoj snazi [-]

Godišnji trošak goriva proizvodne jedinice *i*, $FC_{i,a}$ dobiva se pomoću jednadžbe (11)

$$FC_{i,a} = \frac{FC_i}{\eta_i} \cdot 8760\ h \cdot CF \cdot P_i \quad \textbf{(11)}$$

Gdje je:

FC_i – trošak goriva koje se koristi za pogon proizvodne jedinice *i*, sveden na jedinicu energije, [kn/MWh]

η_i– učinkovitost proizvodne jedinice *i* [%]

Godišnji trošak električne energije otkupljene iz mreže, $C_{el,a}$, dobiva se pomoću jednadžbe (12).

$$C_{el,a} = \sum_j C_{el,j} \cdot E_{el,j} \quad \textbf{(12)}$$

$C_{el,j}$-cijena električne energije, otkupljene po tarifi *j*[kn/MWh]

$E_{el,j}$- električna energija, otkupljena po tarifi j [MWh]

Godišnji trošak toplinske energije otkupljene iz mreže, $C_{h,a}$- dobiva se pomoću jednadžbe (13).

$$C_{h,a} = \sum_k C_{h,k} \cdot E_{h,k} \quad \textbf{(13)}$$

$C_{h,k}$-cijena toplinske energije, otkupljene po tarifi k [kn/MWh]

$E_{h,k}$-toplinska energija, otkupljena po tarifi k [MWh]

Godišnji prihod ostvaren prodajom električne energije, $S_{el,a}$ dobiva se pomoću jednadžbe (14).

$$S_{el,a} = \sum_l E_{el,l} \cdot S_{el,l} \quad \textbf{(14)}$$

$E_{el,l}$- električna energija, isporučena mreži pri cijeni električne energije l [MWh]

$S_{el,l}$- prodajna cijena električne energije pri cijeni električne energije l [kn/MWh]

Specifični trošak proizvodnje toplinske energije, $C_{h,spec}$, dobiva se pomoću jednadžbe ((15):

$$C_{h,spec} = \frac{\sum_i (CC_{a,i} + FO\&M_{i,a} + VO\&M_{i,a} + FC_{i,a} + C_{h,a} - S_{el,a} - S_{H,a})}{Q_H} \quad \textbf{(15)}$$

3.8. Izračun emisije CO_2

Računanje emisije CO_2 provodi se množenjem poznatog utroška pojedinog goriva odgovarajućim faktorom emisije CO_2. Faktor emisije predstavlja prosječnu vrijednost mase CO_2 koji se oslobađa po jedinici energije. Obično se prikazuju u obliku tablica faktora emisije koje sadrže faktore za sve energente koji se koriste, obično na nacionalnoj razini, kao i za sve sustave daljinskog grijanja (toplane, kotlovnice).

Jednadžba (16) daje ukupnu emisiju CO_2:

$$m_{CO2,uk} = m_{CO2,kog} + \sum_{i=1}^{n} m_{CO2,i} \cdot u_i \quad \textbf{(16)}$$

Za kogeneracijsko postrojenje vrijedi:

$$m_{CO2,kog} = m_{CO2,i} \cdot \frac{1}{\eta} - \varepsilon_{el} \cdot m_{C02,el} \quad \textbf{(17)}$$

gdje je:

$m_{CO2,\,uk}$ – specifična ukupna emisija CO_2 [kg/MWh]

u_i – udio i-tog energenta

$m_{CO2,\,i}$ - specifične emisije CO_2 i-tog energenta [kg/MWh]

$m_{CO2,\,kog}$ - specifične emisije ugljičnog dioksida za gorivo kogeneracije [kg/MWh]

η – toplinska iskoristivost kogeneracije [%]

ε_{el} – omjer proizvedene električne i toplinske energije

$m_{CO2,\,el}$ – specifične emisije ugljičnog dioksida za električnu energiju [kg/MWh]

4. ANALIZA GRADSKOG NASELJA TRNSKO

4.1. Opći podatci o naselju

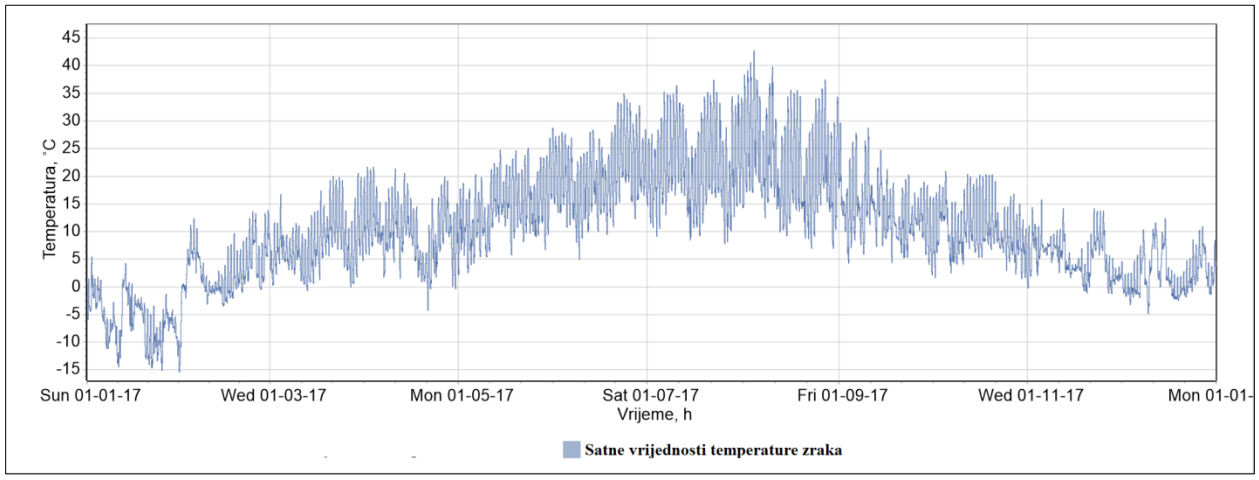
Trnsko je zagrebačko gradsko naselje smješteno na južnoj strani grada, a pripada gradskoj četvrti Novi Zagreb – zapad. Lokaciju naselja prikazuje Slika 19. Naselje je izgrađeno tijekom 60-ih godina 20. stoljeća. Sve zgrade istog su tipa, stambene višekatnice izgrađene od pune cigle debljine 30 cm, sa slojem fasade od 3 cm. 40 % stanova ima jedno staklene prozore, dok ostali stanovi imaju ugrađene PVC prozore [30]. Za grijanje i pripremu PTV-a koriste se individualni plinski kotlovi, a naselje nije spojeno na vrelovodnu mrežu. U sklopu naselja nalaze se osnovna škola i dječji vrtić. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine [28], u naselju Trnsko živi 5331 stanovnik.



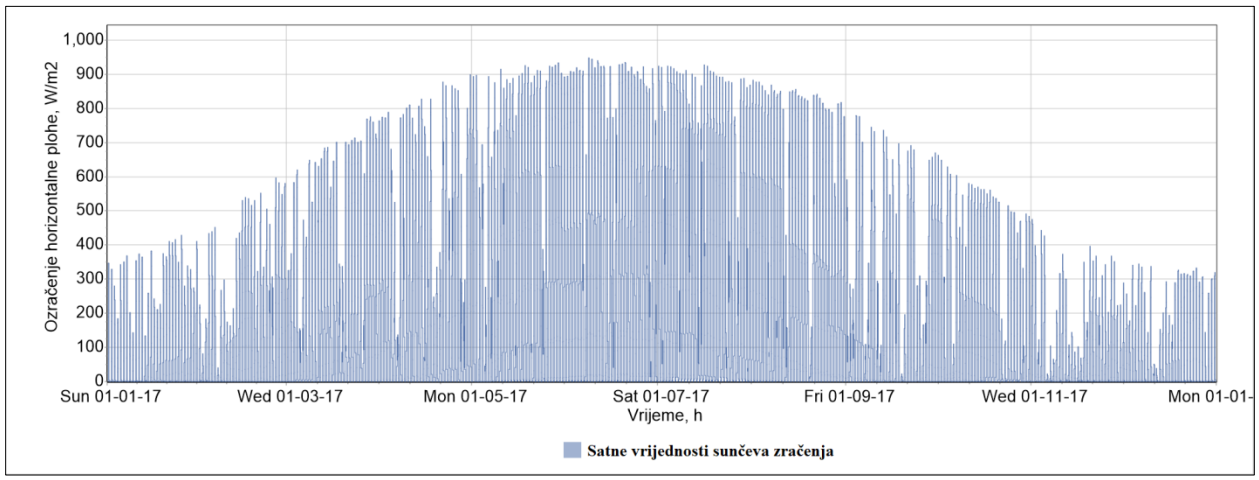
Slika 19. Satelitska snimka zagrebačkog gradskog naselja Trnsko [20]

4.2. Meteorološki podatci

Meteorološki podatci potrebni za izradu ovog rada su satne distribucije temperature okoliša i sunčevog zračenja. Podatci su dostupni u sklopu alata EnergyPRO, a prikupljeni su od strane američkog nacionalnog centra za atmosferska istraživanja (eng. *National Center for Atmospheric Research*) u obliku CFSR 2 (eng. *Climate Forecast System Reanalysis*) datoteke koja sadrži satne podatke o temperaturi, sunčevom zračenju, vlažnosti zraka, oborinama i brzini vjetra, a dostupni su podatci za razdoblje od 2011. godine do danas. Slika 20. prikazuje satnu distribuciju temperature okoliša, a Slika 21. prikazuje satnu distribuciju ozračenja horizontalne plohe.



Slika 20. Godišnja satna distribucija temperature zraka okoliša



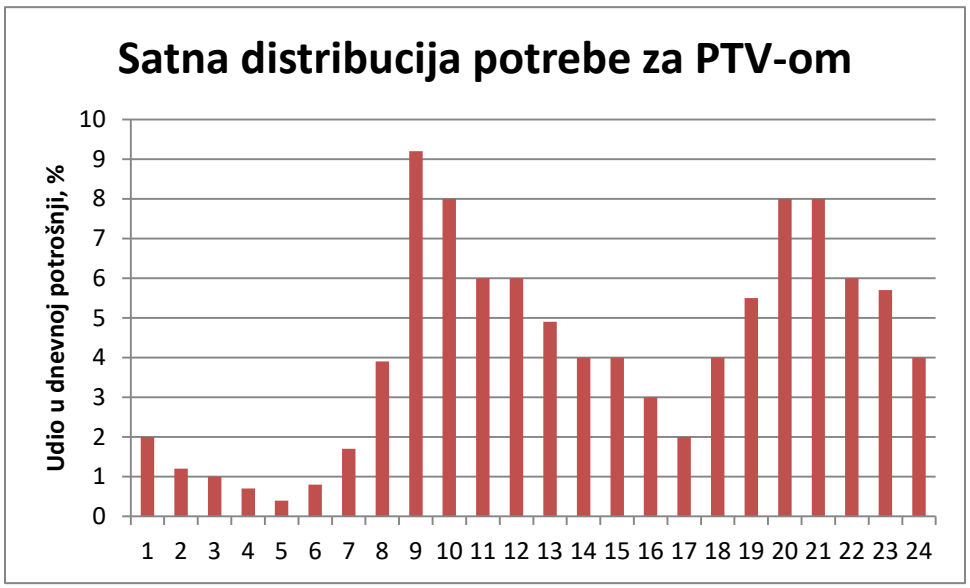
Slika 21. Godišnja satna distribucija ozračenja horizontalne plohe

4.3. Toplinske potrebe

Toplinske potrebe naselja mogu se podijeliti na toplinu potrebnu za pripremu potrošne tople vode i toplinu potrebnu za grijanje. Ukupne toplinske potrebe naselja iznose 55433 MWh godišnje, a izračun je prikazan u sljedećim poglavljima.

4.3.1. Potrošna topla voda

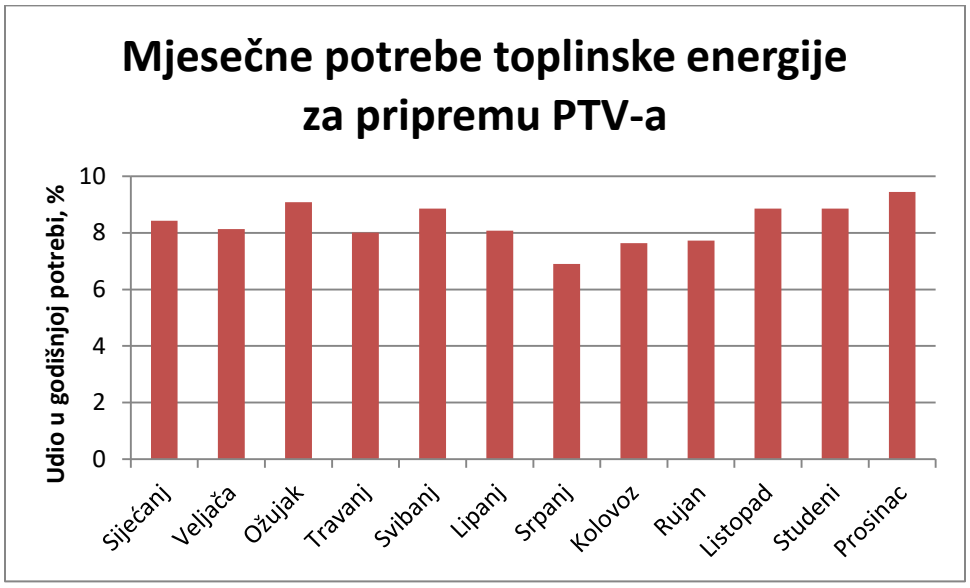
Izračun potreba potrošne tople vode naselja Trnsko proveden je u sklopu znanstvenog rada [22]. Pritom, dobivena je dnevna satna distribucija toplinske energije za grijanje potrošne tople vode, a prikazuje ju Slika 22.



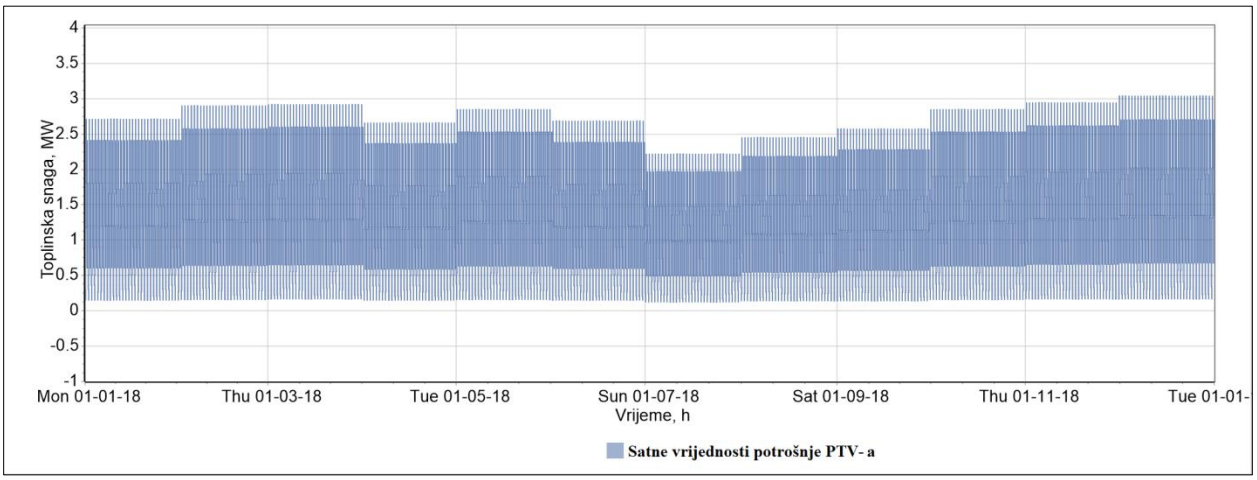
Slika 22. Dnevna potreba za potrošnom toplom vodom

Također, razlika u potrebama toplinske energije za zagrijavanje PTV-a postoji i između mjeseci u godini, što prikazuje Slika 23. Razlog tome leži u nižoj ulaznoj temperaturi vode tijekom zimskih mjeseci te je potrebno više toplinske energije da se ona zagrije na željenu temperaturu [31].

U sklopu rada izračunata je godišnja potrebna količina toplinske energije za pripremu potrošne tople vode koja iznosi 11088 MWh. Slika 24. prikazuje satnu distribuciju toplinske snage potrebne za grijanje PTV-a.



Slika 23. Razlike u mjesečnoj potrebi toplinske energije za pripremu PTV-a

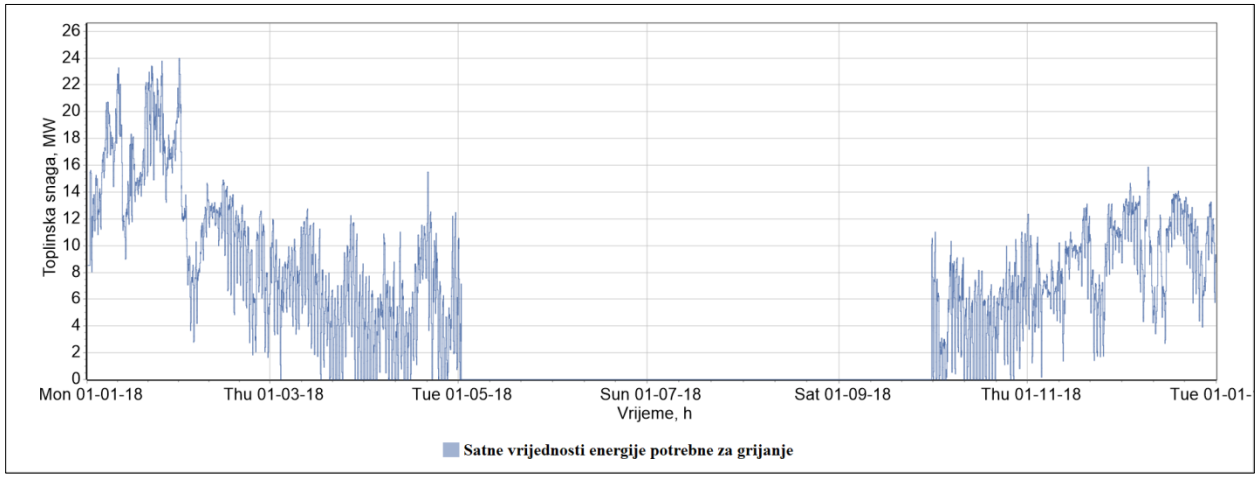


Slika 24. Godišnja satna distribucija toplinske snage za pripremu PTV-a naselja Trnsko

4.3.2. Grijanje

Poput toplinskih potreba za pripremu PTV-a, ukupna godišnja potrebna toplinska energija za grijanje Trnskog već je izračunata u sklopu znanstvenog članka [22] i iznosi 44353 MWh. Distribucijsku krivulju toplinske energije potrebne za grijanje dobiva se na način opisan u poglavlju 3.3.2. Za referentnu temperaturu odabrana je vrijednost od 16 °C, što znači da se sustavi grijanja uključuju samo kada vanjska temperatura padne ispod te vrijednosti. Koeficijent a dobiven je iteracijskim postupkom i iznosi 0,764 MW/°C. Period grijanja ograničen je na

razdoblje godine od 1. listopada do 1. svibnja. Slika 25 prikazuje satnu distribuciju toplinske snage potrebne za grijanje.



Slika 25. Godišnja satna distribucija toplinske snage za grijanje naselja Trnsko

Toplinska energija koja se ne uspije namiriti iz vlastitih izvora kupovat će se iz CTS-a po cijeni od 207 kn/MWh [32].

4.4. Potreba za električnom energijom

Potreba za električnom energijom naselja Trnsko izračunata je skaliranjem krivulje opterećenja distribucijske mreže Republike Hrvatske. Krivulja opterećenja predstavlja svu električnu energiju predanu preko transformatora distribucijskoj mreži i krajnjim korisnicima. Podatci su pribavljeni sa stranica Europske mreže operatora prijenosnog sustava električne energije (eng. *European Network of Transmission System Operators for Electricity*), ENTSO-E [33].[33].

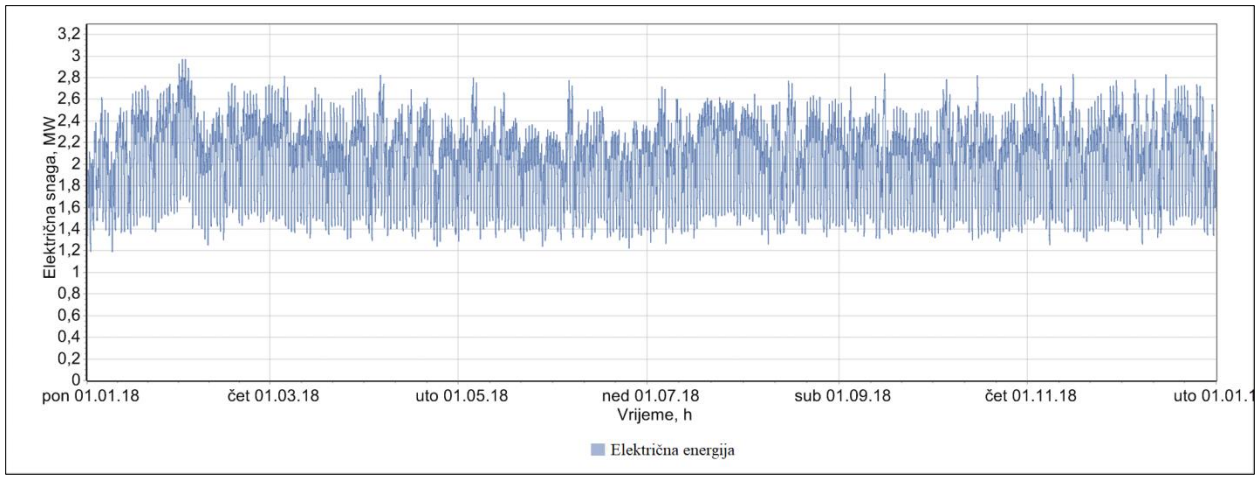
Skaliranje opterećenja na Trnsko izvršeno je množenjem ukupnog opterećenja distribucijske mreže koeficijentom koji predstavlja udio stanovnika naselja Trnsko s ukupnim brojem stanovnika Hrvatske. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine [34], u Hrvatskoj živi 4 284 889 stanovnika, a prema istome popisu, naselje Trnsko broji 5331 stanovnika. Omjer ove dvije veličine predstavlja koeficijent skaliranja i iznosi 803,77.

Također, potrebno je u obzir uzeti i gubitke distribucijske mreže. Za Republiku Hrvatsku, distribucijski gubici mreže iznose 13 % [31].

Slika 26 prikazuje satnu distribuciju električne snage za zadovoljavanje potreba za električnom energijom.

Cijena električne energije za kućanstva određuje se prema HEP-ovom tarifnom modelu Bijeli [19]. To je dvotarifni sustav s višom, VT, (7-21 h) i nižom, NT, (21-7) tarifom. Cijena u višoj tarifi iznosi 0,95 kn/kWh, a u nižoj tarifi 0,46 kn/kWh.

Osim kućanstava, potrošač električne energije je i dizalica topline. Kako je njezina priključna snaga veća od 20 kW, za nju će se primjenjivati HEP-ov tarifni model Crveni. U njemu, cijena više tarife iznosi 0,84 kn/kWh, a niže 0,41 kn/kWh.



Slika 26. Godišnja satna distribucija električne snage za Trnsko

4.5. Dostupne površine za postavljanje solarnih kolektora i fotonaponskih ćelija

Naselje Trnsko sačinjava 49 stambenih zgrada ravnih krovova i 16 natkrivenih parkirnih površina. Za mjerenje krovnih površina korišten je alat u sklopu geoportala grada Zagreba [20]. Prilikom mjerenja korištena je podloga imena Osnovna karta 2012.

Ova podloga sadrži pojednostavljeni satelitski prikaz u kojem je moguće vidjeti tlocrtne površine zgrada te njihove kućne brojeve (Slika 27). Tablica 2 prikazuje tlocrtne površine stambenih zgrada. Prema tome, ukupna površina krovova stambenih zgrada iznosi 43800 m^2.



Slika 27. Prikaz tlocrtnih površina zgrada u Trnskom [20]

Tablica 2. Krovne površine stambenih zgrada

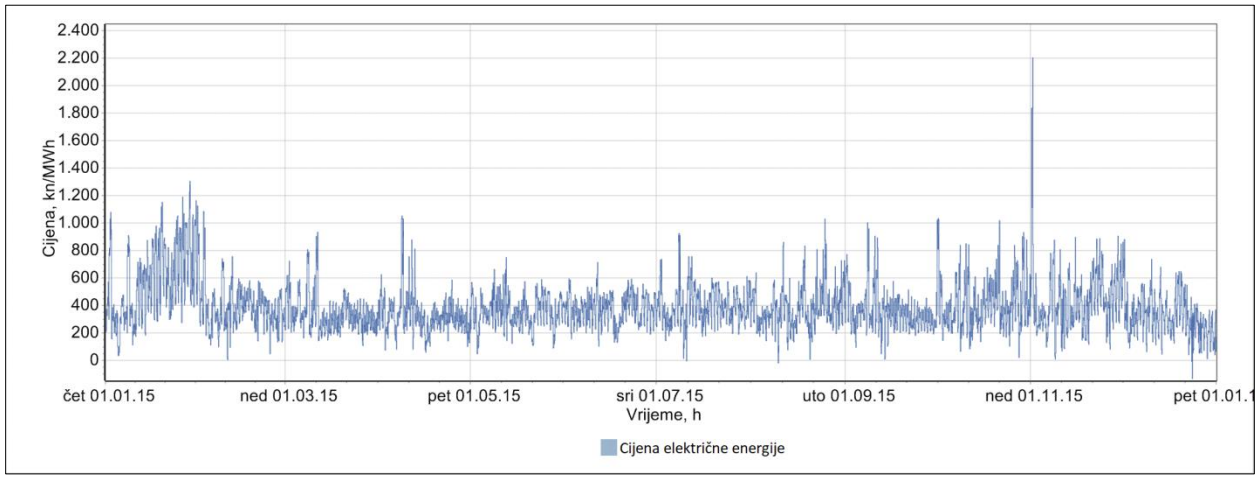
Kućni broj	Površina [m^2]	Kućni broj	Površina [m^2]	Kućni broj	Površina [m^2]	Kućni broj	Površina [m^2]
1	1246	14	640	26	300	38	1086
2	1100	15	1225	27	300	39	1482
3	600	16	615	28	300	40	643
4	600	17	615	29	1430	41	1025
6	1036	18	1225	30	600	42	1025
7	1036	19	1257	31	1450	43	352
8	670	20	300	32	630	44	352
9	1044	21	1975	33	1051	45	352
10	615	22	453	34	1030	46	1041
11	615	23	300	35	1482	47	643
12	360	24	300	36	643	48	1025
13	640	25	5000	37	1025	49	1025

Osim stambenih zgrada, postoji i 16 manjih natkrivenih parkirnih prostora ukupne površine 5300 m^2. Zbog postavljenih antena i klima uređaja na krovove zgrade, nije moguće koristi cijelu površinu krovišta. Literatura [21], temeljem analize na bazi geografskog informacijskog sustava (eng. *Geographic information system*), GIS –a, procjenjuje dostupne površine na 6,5 – 59 % ukupne krovne površine. Zbog velikog broja uređaja na krovovima zgrada u ovome radu

korištena je vrijednost od 35 %. Prema tome, dostupna krovna površina za postavljanje pločastih solarnih kolektora i fotonaponskih ćelija iznosi 17185 m^2.

4.6. Burza električne energije

Višak proizvedene električne energije prodavat će se u mrežu, a prodajna cijena određuje se prema ponudi i potražnji na burzi električne energije. Model prema kojem je izrađeno tržište električnom energijom u ovome radu je CROPEX – hrvatska burza električne energije [25]. Kretanje cijena na burzi prikazuje Slika 28.



Slika 28. Cijena električne energije, CROPEX [25]

5. SCENARIJI

Diplomskim radom predviđena je izrada najmanje dva scenarija kojima će se analizirati tehnička mogućnost te ekonomska isplativost primjene koncepata potrošnje energije s vlastitom proizvodnjom za različite kombinacije proizvodnih tehnologija. S ciljem detaljnijeg uvida, izrađen je i dodatan scenarij. Scenarije prikazuje Tablica 3.

Tablica 3. Tehnologije korištene u scenarijima

SCENARIJ 1		SCENARIJ 2		SCENARIJ 3	
Toplinska energija	Električna energija	Toplinska energija	Električna energija	Toplinska energija	Električna energija
Pločasti solarni kolektori	Fotonaponske ćelije	Kogeneracijsko postrojenje		Kogeneracijsko postrojenje	
Dizalica topline		Pločasti solarni kolektori	Fotonaponske ćelije	Pločasti solarni kolektori	Fotonaponske ćelije
		Dizalica topline		Dizalica topline	
				Toplinski spremnik	

Kako Trnsko nije povezano na vrelovodnu mrežu grada Zagreba, prioritet će predstavljati zadovoljavanje toplinskih potreba, a tek nakon toga električnih.

5.1. Referentni scenarij

Referentnim scenarijom analizirat će se trenutna situacija po pitanju potrošnje energije i energenata u naselju Trnsko. Naselje nije spojeno na centralizirani toplinski sustav već se za grijanje koriste individualni plinski kotlovi.

Prema tome, instalirana snaga plinskih kotlova iznosi 26,4 MW. Prema [34] u naselju Trnsko nastanjeno je 2451 kućanstvo. Ako se pretpostavi da svako kućanstvo posjeduje jedan plinski kotao, instalirana snaga po kućanstvu iznosi 10,8 kW. Tablica 4 prikazuje tehničke podatke plinskih kotlova prema [35]:

Tablica 4. Specifikacija plinskih kotlova

Prosječna snaga jedne jedinice [kW]	10
Ukupna efikasnost [%]	97

Potrošnja električne energije za pomoćne usluge [kWh/god]	150
Životni vijek [god]	20
Cijena investicije [kn]	23775
Dodatni specifični troškovi [kn]	7450

Iz Tablice (4 proizlazi da je broj kotlova u naselju 2640, prosječne snage 10 kW. Investicija u jednu jedinicu jednaka je zbroju cijene investicije i dodatnih specifičnih troškova i iznosi 31225. Prema tome, ukupna investicija za cijelo naselje iznosi 82434000 kn.

Godišnje potrebna toplinska energija iznosi 55443 MWh. Kako je prosječna efikasnost kotlova 97 %, potrebno je utrošiti 57158 MWh prirodnog plina. Cijena prirodnog plina u Hrvatskoj prema [36] iznosi 417,5 kn/MWh, iz čega proizlazi godišnji trošak za pogon kotlova, koji iznosi 23863465 kn.

Emisija CO_2 dobiva se množenje ukupne potrošnje goriva emisijskim faktor pripadnog goriva. Za prirodni plin, emisijski faktor CO_2 iznos 220,20 kg CO_2/MWh. Ukupna emisija iznosi 12586,2 tCO_2.

5.2. Scenarij 1

Proizvodne tehnologije dostupne u scenariju 1 čine pločasti solarni kolektori, fotonaponske ćelije i dizalica topline. Specifikacije pločastih kolektora dobivene su od mentora i iznose:

Tablica 5. Specifikacija pločastih kolektora

Parametar	Vrijednost
η_a	0,827
a_1 [W/(m^2 °C)]	1,18
a2 [W/(m^2 °C)]	0,032
K^{Θ}	0,968

Kut nagiba (inklinacija) u odnosu na zemljinu površinu iznosi 35°. Ulazna temperatura vode u kolektor je 30 °C, a izlazna 80 °C. Gubici u cijevima iznose 4 % proizvedene toplinske energije.

Kako ovim scenarijom ne postoji mogućnost pohrane toplinske energije, površina pločastih solarnih kolektora dimenzionirana je tako da se zadovolje ljetna vršna toplinska opterećenja. Prema tome, optimalna površina pločastih solarnih kolektora iznosi 1600 m^2.

Specifikacije fotonaponskih ćelija definirane su na temelju monokristalnih silikonskih fotonaponskih modula tvrtke Mitsubishi Electric, model PV-MLT260HC. Svaki od modula sadrži 120 fotonaponskih ćelija. Specifikacije prikazuje Tablica 6.

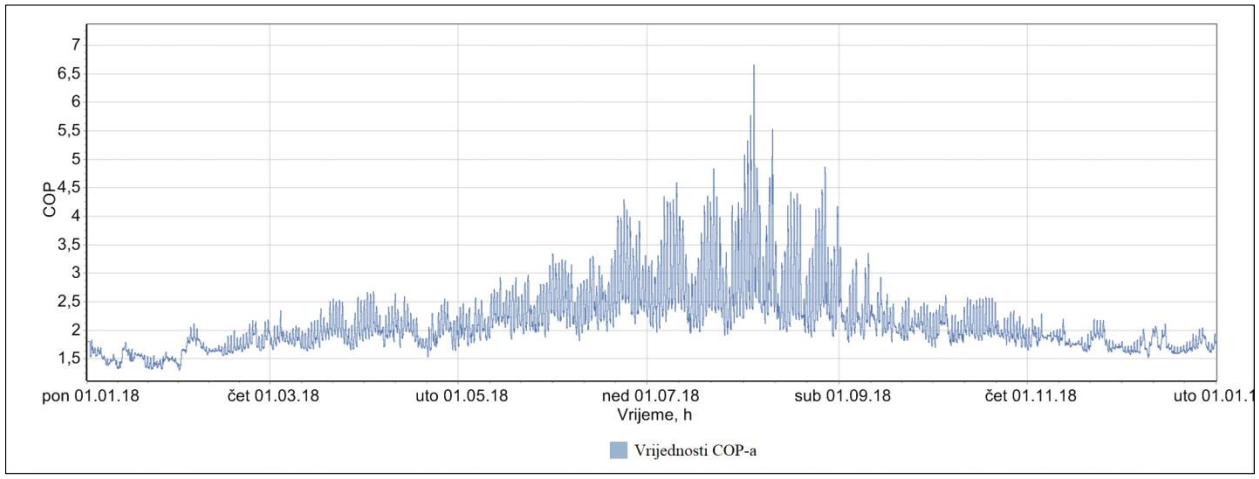
Tablica 6. Specifikacija fotonaponskih ćelija

Parametar	**Vrijednost**
P_{max} [W]	260
k_{Pmax} [%/°C]	-0,450
NOCT [°C]	47

Kut nagiba, kao i kod pločastih kolektora, iznosi 35 %, čime se osigurava maksimalna proizvodnja u ljetnim mjesecima. Gubici prijenosa električne energije od modula do mreže iznose 7 % proizvodnje. Fotonaponske ćelije mogu prekrivati preostalu dostupnu krovnu površinu, što iznosi 15585 m^2, što odgovara električnoj snazi od 1,63 MW.

U scenariju 1 dizalica topline predstavlja glavni izvor toplinske energije te ju je potrebno dimenzionirati za pokrivanje što većeg baznog opterećenja. Odabrana je dizalica topline zrak-voda (eng. *water-to-air heat pump*), maksimalne toplinske snage 13 MW. Kao toplinski izvor koristi se vanjski zrak, čiju satnu distribuciju prikazuje Slika 20, i pritom se hladi za 5 °C. Ulazna temperatura vode u sustavu iznosi 30 °C, a izlazna 80 °C. Vrijednosti COP-a, ovisne o vanjskoj temperaturi zraka, prikazuje Slika 27.

Za pokrivanje vršnog toplinskog opterećenja koristit će se toplinska energija iz CTS-a.

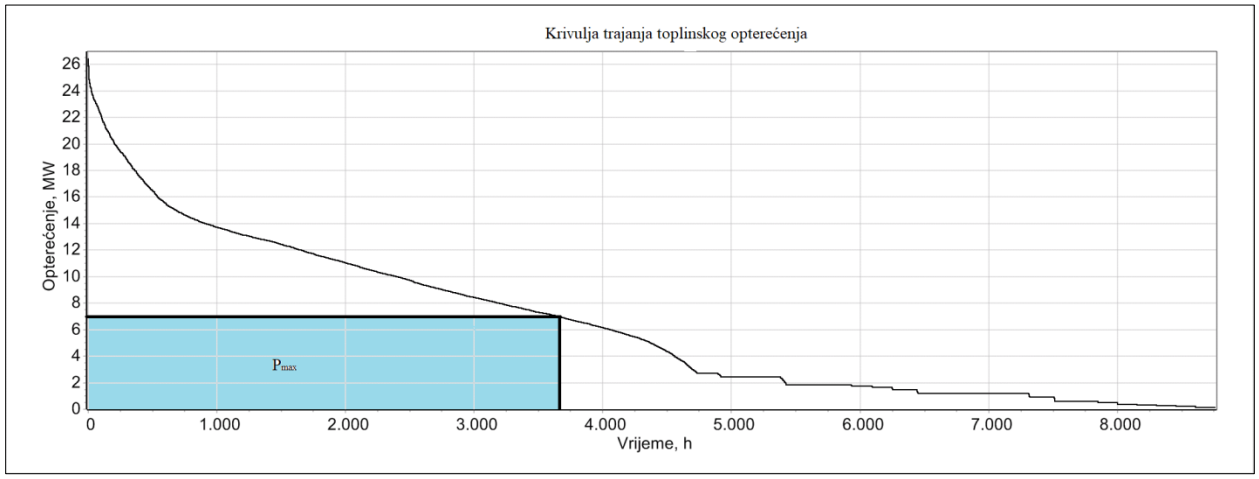


Slika 29. Godišnje satne vrijednosti COP-a

5.3. Scenarij 2

U scenariju 2 dodaje se mogućnost uklapanja kogeneracijskog postrojenja u proizvodni sustav. Kako je težnja svih scenarija na što većem udjelu obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji, kao gorivo koristit će se biomasa, točnije, bukova drvna sječka vlažnosti 30 % čija je ogrjevna vrijednost 3375 kWh/tona. Nabavna cijena biomase s prijevozom iznosi 323 kn/tona [37]. Dimenzioniranje kogeneracijskog postrojenja izvedeno je nalaženjem maksimalne površine pravokutnika ispod krivulje trajanja, uvažavajući i tehnički minimum rada kogeneracije od 4000 sati godišnje. Ta površina predstavlja maksimum toplinske energije koji se može proizvesti pri konstantnom opterećenju u nekom vremenskom periodu. U ovome slučaju, maksimalna površina iznosi 25848 MWh, a dobiva se za opterećenje od 7,2 MW u vremenskom periodu od 3600 sati. Iako je to manje od 4000 sati, mogućnost kogeneracije da radi na manjim opterećenjima osigurava traženi broj sati. Sukladno tome, odabrana je nazivna toplinska snaga kogeneracijskog postrojenja od 7,2 MW.

Kogeneracijsko postrojenje sastoji se od kotla na biomasu gdje se voda zagrijava, isparava i pregrijava, protutlačne parne turbine gdje ekspandira i kondenzatora u kojem para kondenzira pri temperaturi pogodnoj za korištenje u sustavima grijanja.



Slika 30. Dimenzioniranje CHP-a

Prema [38], odabrani su ostali parametri kogeneracijskog postrojenja, a prikazuje ih Tablica 7.

Tablica 7. Specifikacija kogeneracijskog postrojenja

Parametar	**Vrijednost**
Omjer električne i toplinske snage	0,35
η_{el}	0,19
η_{to}	0,63
P_{el} [MW]	2,5
P_{to} [MW]	7,2

Vrijeme pokretanja postrojenja (hladni start) iznosi 720 minuta, a minimalni period rada je 6 sati. Remont se obavlja jednom godišnje u periodu od 1. srpnja do 1. kolovoza i tada postrojenje obustavlja proizvodnju.

Kako niti ovaj scenarij ne omogućuje pohranu toplinske ili električne energije, krovne površine koje pokrivaju pločasti solarni kolektori i fotonaponske ćelije se ne mijenjaju, a također, jednake su i specifikacije koje prikazuju Tablica 5 i Tablica 6.

U ovome slučaju, dizalica topline dimenzionira se tako da pokrije preostalo toplinsko opterećenje, osim vršnih 15 % koje će se namirivati iz vrelovodne mreže. Maksimalna toplinska

snaga dizalice topline u ovome slučaju iznosi 6,5 MW. Vrijednosti COP-a jednake su kao u scenariju 1, a prikazuje ih Slika 29.

5.4. Scenarij 3

Scenarij 3, uz sve proizvodne jedinice dosad korištene u scenarijima 1 i 2, uvodi mogućnost pohrane topline u toplinskom spremniku.

Pločasti solarni kolektori u ovome će scenariju, zbog mogućnosti pohrane topline, imati veću važnost nego u prijašnjim scenarijima. Zbog toga će u ovome slučaju njihova površina iznositi 10 000 m^2. Specifikacije pločastih kolektora jednake su kao u prethodnim scenarijima, a prikazuje ih Tablica 5.

Sukladno promjeni površine solarnih kolektora mijenja se i površina fotonaponskih ćelija. Njihova površina u ovome slučaju iznosi 7185 m^2, odnosno, 773 kW. Specifikacije fotonaponskih ćelija prikazuje Tablica 6.

Kogeneracijsko postrojenje u scenariju 2 dimenzionirano je tako da pokriva bazno opterećenje te će i u ovome slučaju imati istu namjenu i snagu. Razlika u odnosu na scenarij 2 je u mogućnosti kogeneracijskog postrojenja da pohranjuje energiju u toplinski spremnik. Tablica 7 prikazuje specifikacije kogeneracijskog postrojenja.

Također, neće se mijenjati ni snaga dizalice topline. I u ovome slučaju koristit će se dizalica topline zrak-voda čije vrijednosti COP-a prikazuje Slika 29.

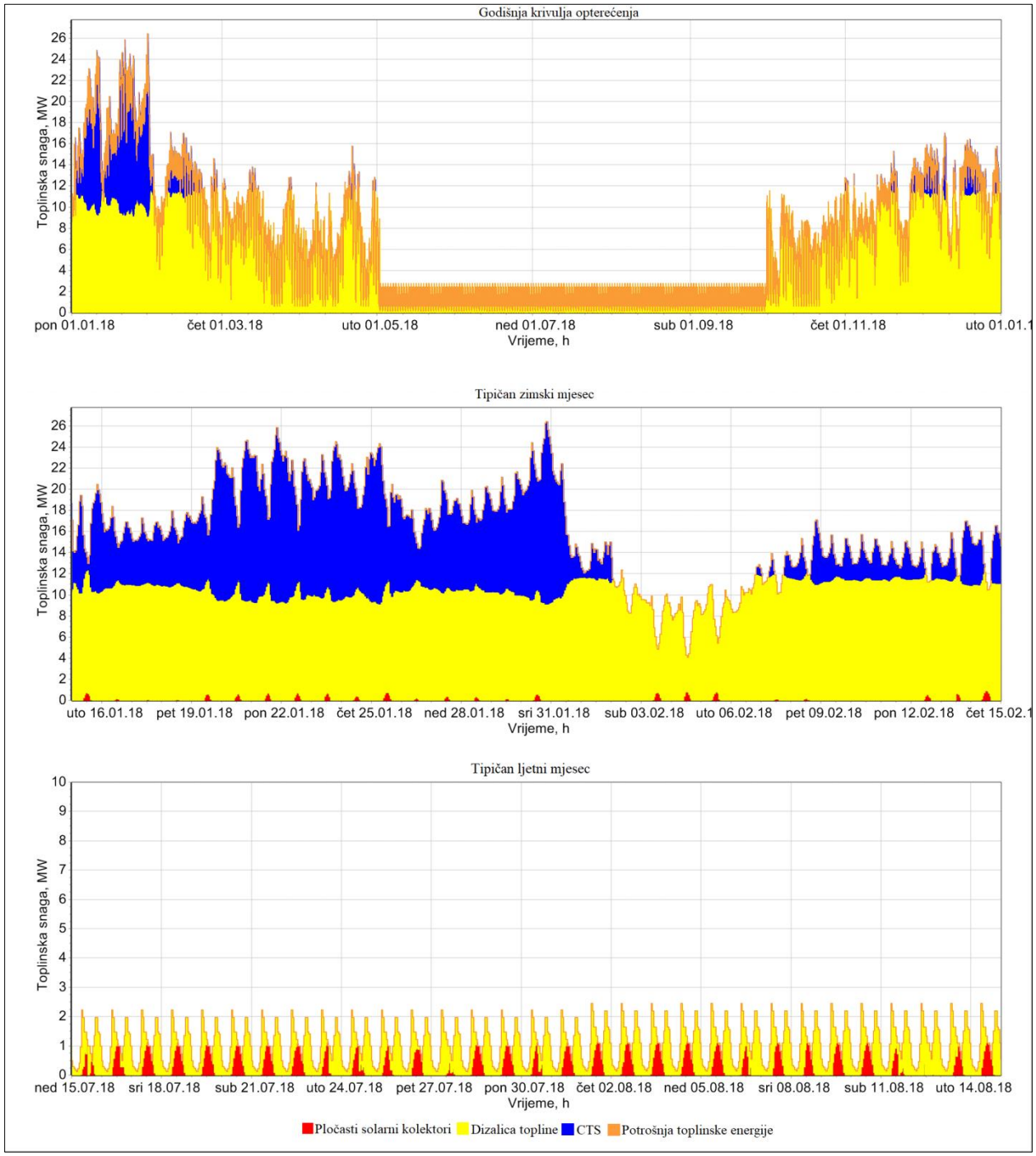
Razlika u odnosu na scenarij 2 je u toplinskom spremniku. Spremnik je podzemni, sezonski s vodom kao radnim medijom, volumena 100000 m^3. Temperatura u spremniku kreće se od maksimalnih 90 °C do minimalnih 50 °C. Debljina izolacije iznosi 300 mm, a koeficijent toplinske provodljivosti iznosi 0,037 W/(m°C). Iskoristivost spremnika iznosi 90 %, a način izračuna toplinskih gubitaka spremnika prikazuje jednadžba (5).

6. REZULTATI

U ovome poglavlju prikazani su rezultati modeliranja u računalnom alatu EnergyPRO. Dobiveni rezultati su:

- Godišnja krivulja proizvodnje toplinske energije
- Godišnja krivulja proizvodnje električne energije
- Krivulje proizvodnje toplinske i električne energije u karakterističnim ljetnim i zimskim mjesecima
- Krivulja trajanja toplinskog opterećenja
- Krivulja trajanja električnog opterećenja

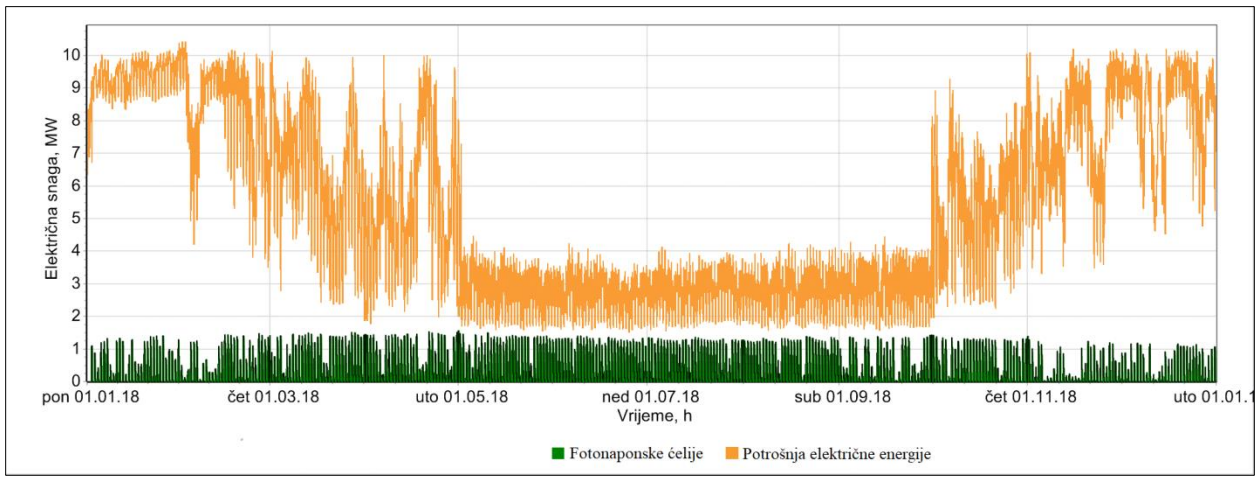
6.1. Scenarij 1



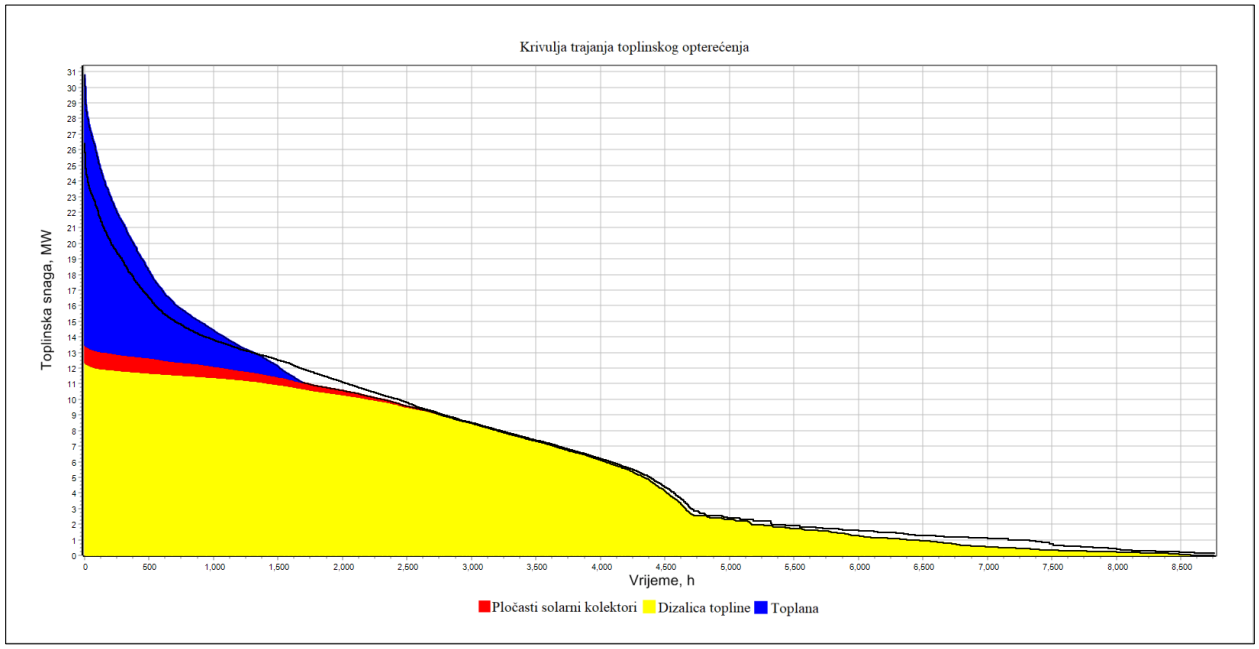
Slika 31. Scenarij 1: Godišnja satna krivulja proizvodnje toplinske energije i prikaz tipičnih mjeseci

Slika 31 prikazuje krivulju godišnje proizvodnje toplinske energije te karakterističan ljetni i zimski mjesec. Većinu proizvodnje tijekom godine ostvaruje dizalica topline (46554,4 MWh, 84 %), a vršna opterećenja pokriva toplinska energija iz CTS-a (7360,3 MWh, 13,3 %). Proizvodnja iz pločastih solarnih kolektora (1516 MWh, 2,8 %) ima mali udio u ukupnoj godišnjoj proizvodnji, ali čini značajan dio proizvodnje u ljetnim mjesecima.

Slika 32 prikazuje krivulju godišnje proizvodnje električne energije. Jedini proizvođač u ovom scenariju su fotonaponske ćelije. Njihova proizvodnja iznosi 2633,4 MWh godišnje i služi isključivo za zadovoljavanje vlastitih potreba.

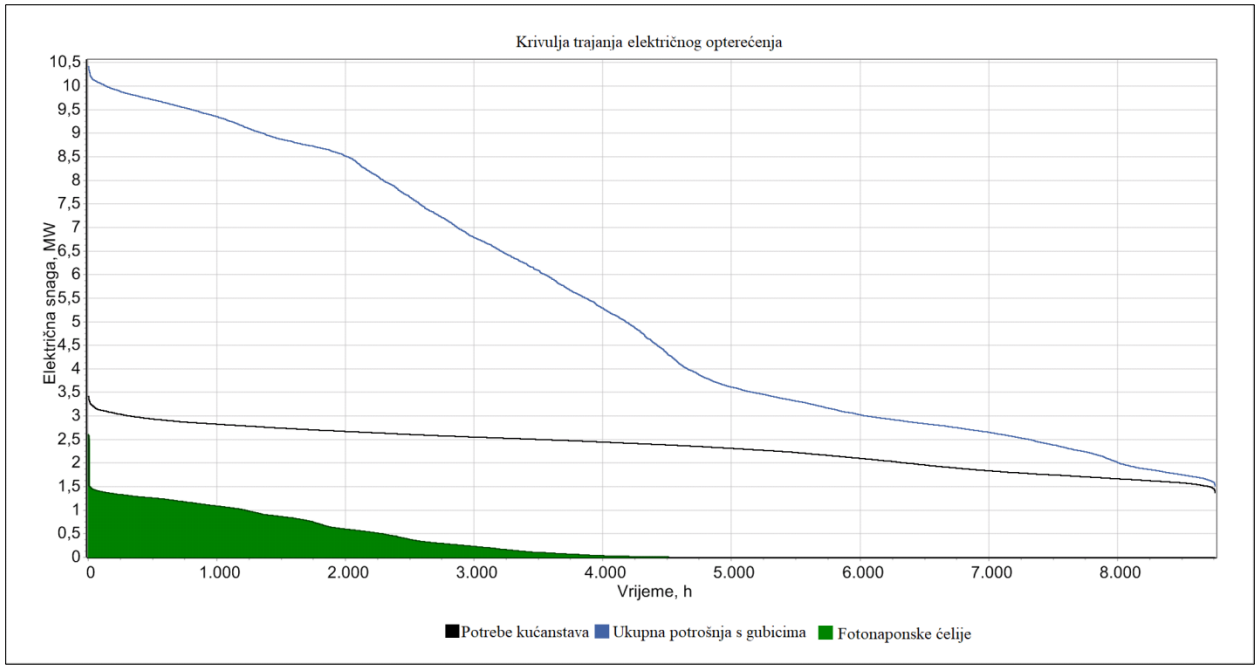


Slika 32. Scenarij 1: Godišnja proizvodnja električne energije



Slika 33. Scenarij 1: Krivulja trajanja toplinskog opterećenja

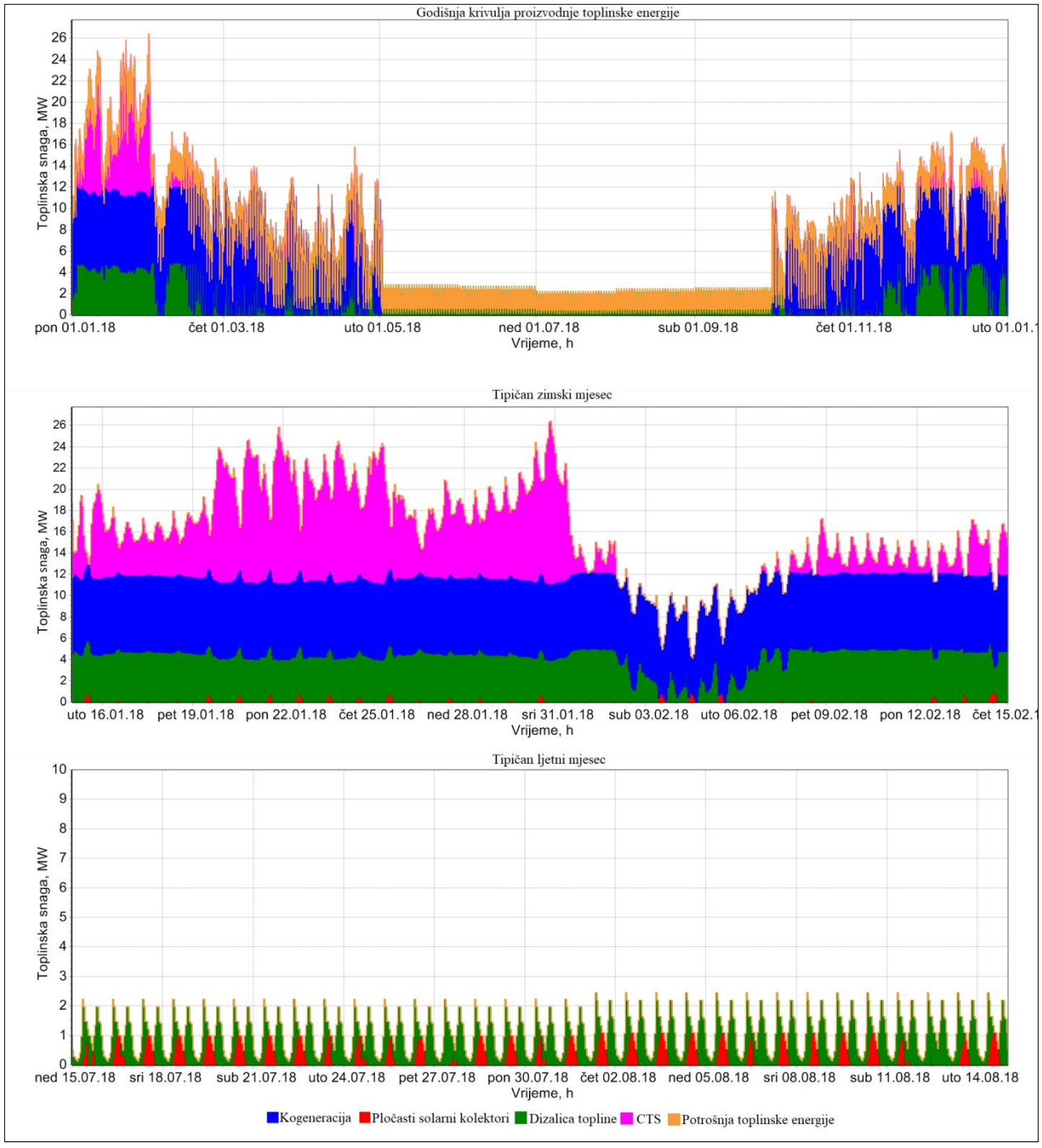
Iz krivulje trajanja toplinskog opterećenja (Slika 33) jasnije se vidi proizvodnja topline iz pločastih solarnih kolektora. Njihova proizvodnja najveća je prilikom manjih opterećenja (ljeti), a manja kod većih opterećenja (zimi).



Slika 34. Scenarij 1: Krivulja trajanja električnog opterećenja

Slika 34 prikazuje krivulju trajanja električnog opterećenja. Iz nje proizlazi da je proizvodnjom iz fotonaponskih ćelija moguće podmiriti tek manji dio ukupnih potreba za električnom energijom. Također, vidljivo je da zadovoljavanjem toplinskih potreba dizalicom topline značajno raste potreba za električnom energijom, s 17696,4 MWh na 43969,4 MWh. Udio vlastite proizvodnje u ukupnoj potrošnji iznosi 6 %.

6.2. Scenarij 2

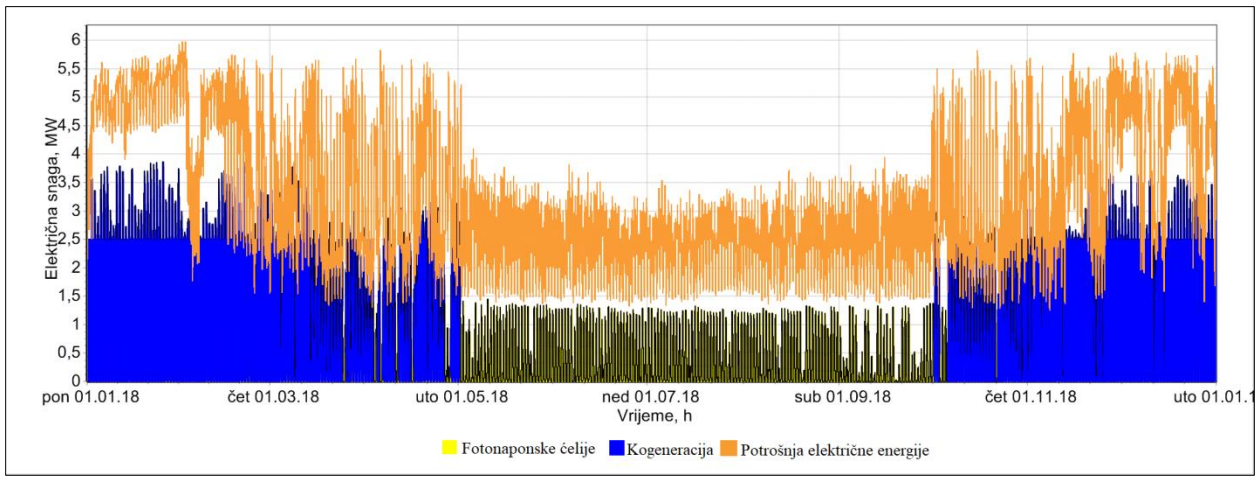


Slika 35. Scenarij 2: Godišnja krivulja proizvodnje toplinske energije

Slika 35 prikazuje godišnju krivulju proizvodnje toplinske energije iz koje je vidljivo da bazno opterećenje pokrivaju kogeneracijsko postrojenje (27938,7 MWh, 50,4 %) i dizalica topline

(19367 MWh, 34,9 %). Pločasti solarni kolektori pridonose sa 1540,1 MWh proizvedene topline, što je 2,8 % ukupne proizvodnje. Ukupno, proizvodnja topline iz vlastitih izvora iznosi 88,1 % potreba, odnosno 48845,8 MWh. Preostala toplina dobivena je iz CTS-a i služi za pokrivanje vršnih opterećenja.

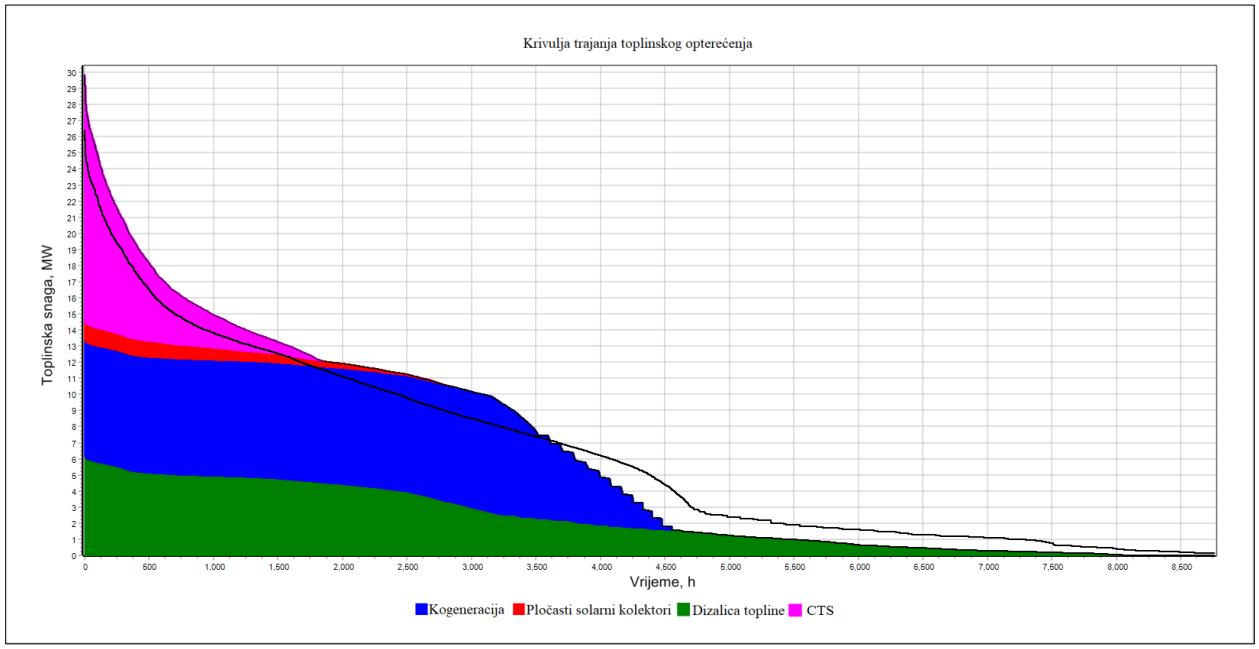
Zbog nemogućnosti pohrane energije, tehničkih ograničenja te promjenjive krivulje toplinskih potreba, kogeneracijsko postrojenje nije u mogućnosti održati kontinuiranu proizvodnju na maksimalnoj snazi. Zbog toga, tijekom godine ima veliki broj gašenja i pokretanja (38) što prikazuje Slika 37.



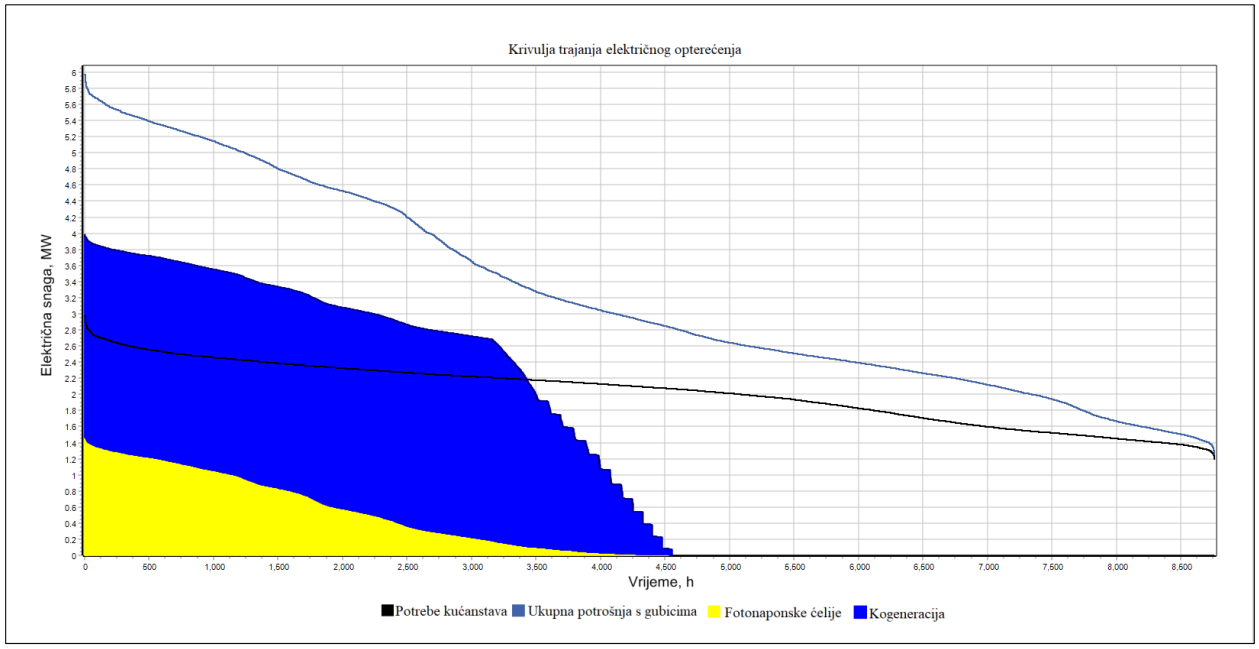
Slika 36. Scenarij 2: Godišnja krivulja proizvodnje električne energije

Proizvodnu krivulju električne energije prikazuje Slika 36. U usporedbi s proizvodnjom u scenariju 1, vidljivo je značajno povećanje u proizvodnji električne energije. Tome pridonosi kogeneracijsko postrojenje koje osim toplinske energije proizvodi i značajne količine električne energije. Godišnja proizvodnja iz kogeneracije iznosi 9720,4 MWh, a fotonaponskih ćelija 2551,1 MWh. Ukupno, njihova proizvodnja iznosi 12271,4 MWh što je udio od 43,2 % u ukupnoj potrošnji električne energije koja iznosi 28388,9 MWh.

Slika 38 prikazuje krivulju trajanja električnog opterećenja. U usporedbi sa scenarijom 1, vidljivo je smanjenje potrošnje električne energije u iznosi 15580,5 MWh koje je posljedica smanjenja snage dizalice topline. Također, električna energija nije se koristila samo za zadovoljavanje vlastitih potreba, već i za prodaju na tržištu. Iznos isporučene električne energije u mrežu iznosi 409,6 MWh.

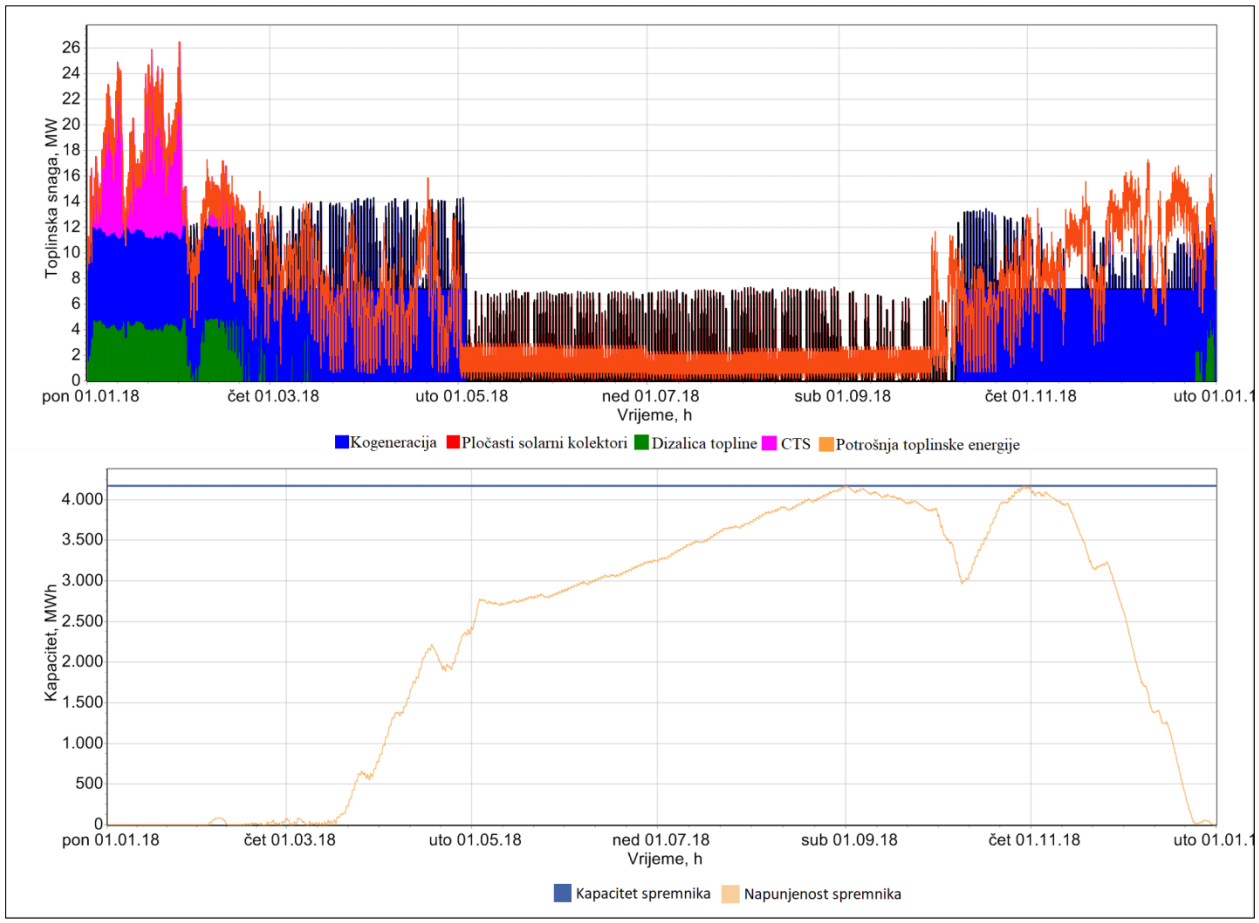


Slika 37. Scenarij 2: Krivulja trajanja toplinskog opterećenja



Slika 38. Scenarij 2: Krivulja trajanja električnog opterećenja

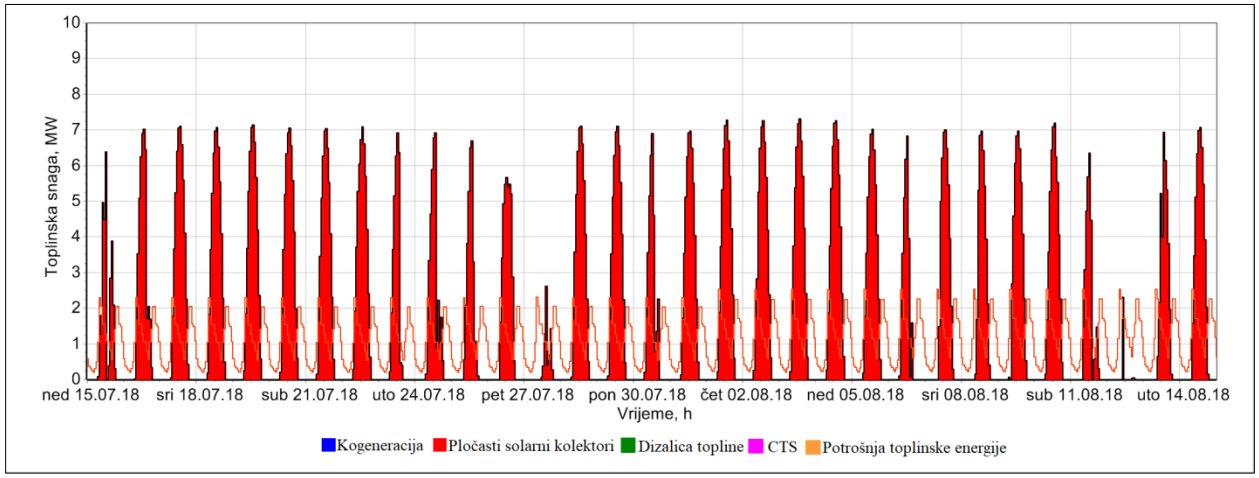
6.3. Scenarij 3



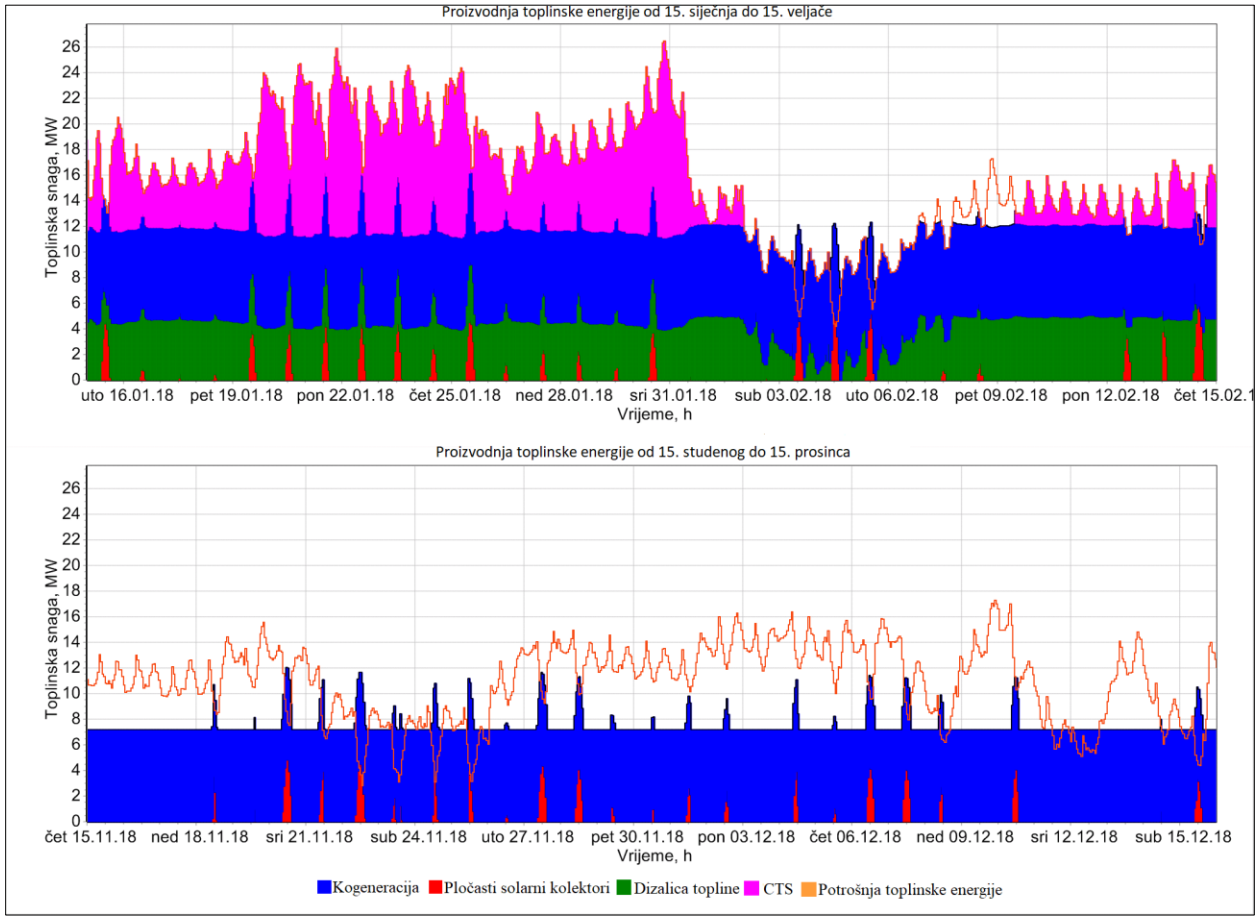
Slika 39. Scenarij 3: Godišnja krivulja proizvodnje toplinske energije (gore) i napunjenost toplinskog spremnika (dolje)

Iz godišnje krivulje proizvodnje (Slika 39, gore) vidljivo je da bazno opterećenje u zimskim mjesecima i u ovome slučaju pokriva kogeneracija koja proizvodi 35673,6 MW. Prilikom vršnih opterećenja, u razdoblju od siječnja do veljače, u proizvodnji sudjeluje i dizalica topline, a preuzima se i toplina iz CTS-a. Godišnja proizvodnja dizalice topline iznosu u ovome scenariju 6054,2 MWh, što je značajno niže nego u scenariju 2 (19367 MWh), a iz CTS-a je preuzeto 4765,6 MWh toplinske energije. Razlog značajnog pada proizvodnje dizalice topline je u korištenju sezonskog toplinskog spremnika. Napunjenost spremnika tijekom godine prikazuje Slika 39, dolje. Iz nje proizlazi da punjenje spremnika počinje nakon razdoblja vršnih opterećenja kada pločasti solarni kolektori zajedno s kogeneracijom mogu proizvesti više toplinske energije nego je potrebno za zadovoljavanje toplinskih potreba. U ljetnim mjesecima,

za proizvodnju topline i punjenje toplinskog spremnika, dovoljna je kombinacija solarnih kolektora i spremnika što prikazuje Slika 40.

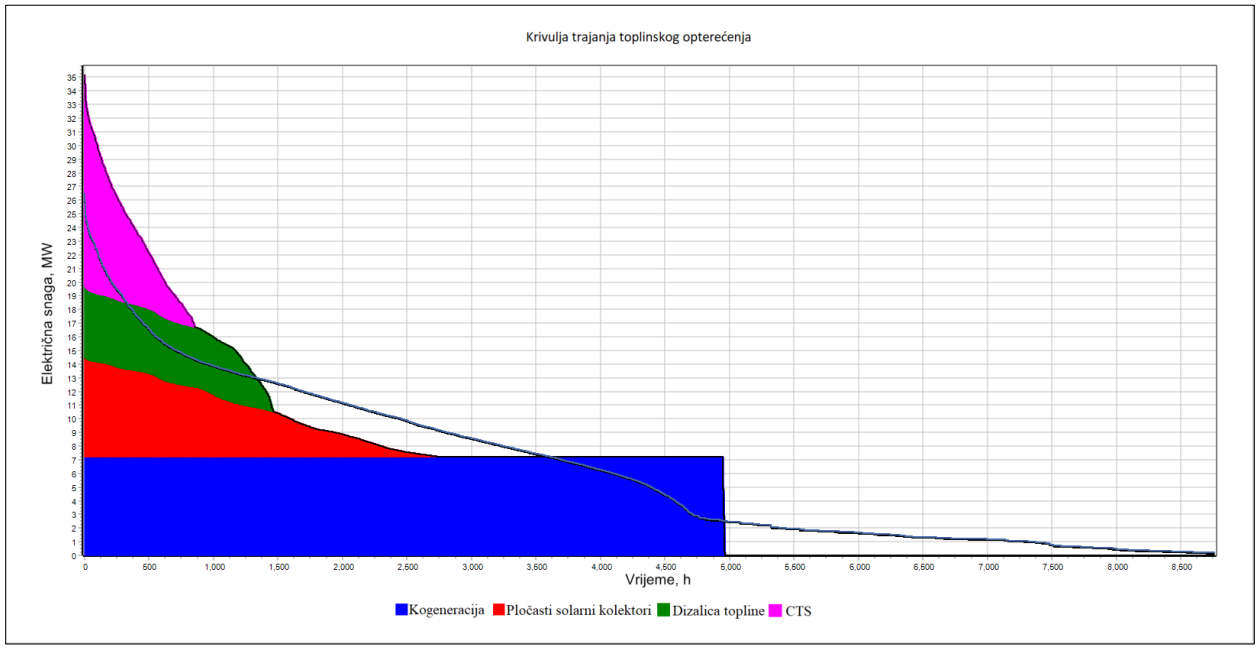


Slika 40. Scenarij 3: Proizvodnja toplinske energije u tipičnom ljetnom mjesecu



Slika 41. Scenarij 3: Proizvodnja toplinske energije u zimskom periodu

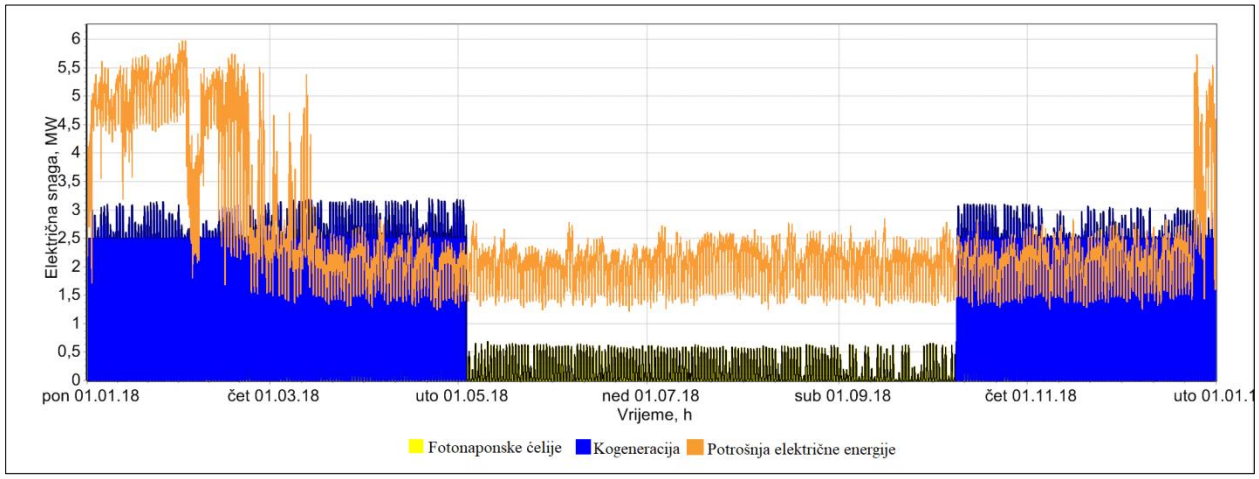
Slika 41 prikazuje dva tipična zimska razdoblja. U razdoblju od 15. siječnja do 15. veljače, kada je sezona grijanja na vrhuncu, toplinski spremnik je prazan (Slika 39, dolje) te se sva potrebna energija namiruje proizvodnjom u tim trenucima. S druge strane, u razdoblju od 15. studenog do 15. prosinca, toplinski spremnik sadrži dovoljno toplinske energije, proizvedene u ljetnim mjesecima, za pokrivanje svih vršnih potreba u tom razdoblju, čime se smanjuju potrebe za električnom energijom (dizalica topline) i kupnjom topline iz CTS-a.



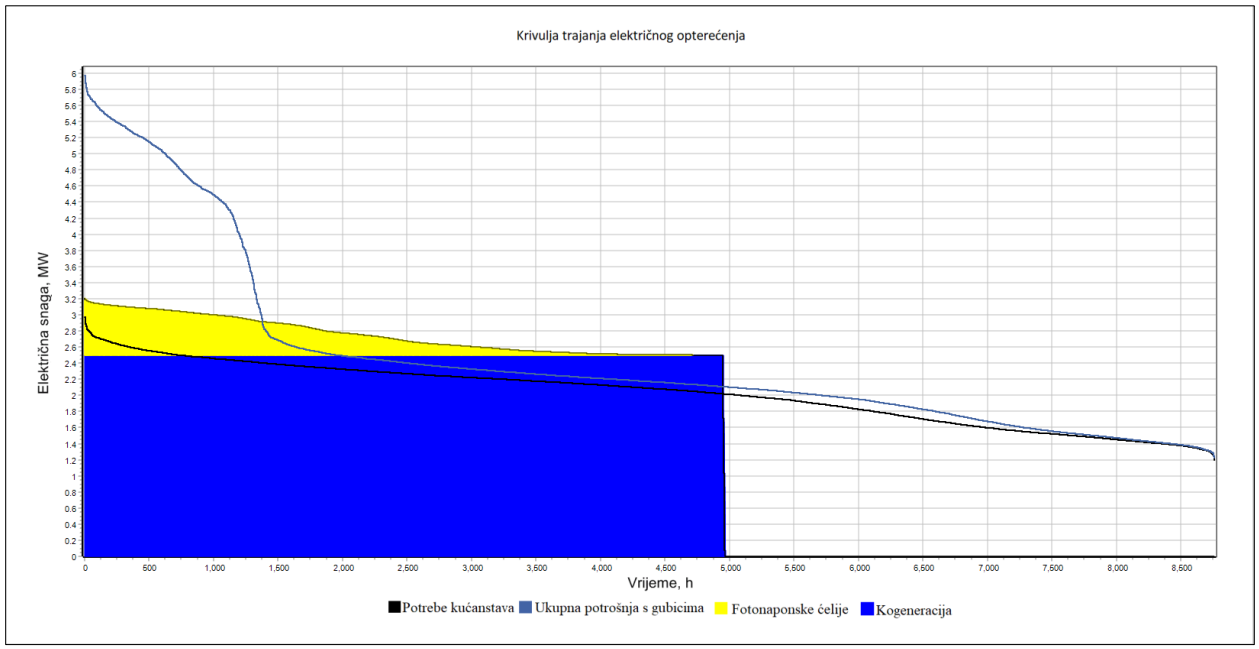
Slika 42. Scenarij 3: Krivulja trajanja toplinskog opterećenja

Još jednu prednost korištenja toplinskog spremnika prikazuje Slika 42. Zbog mogućnosti pohrane topline, više ne postoji potreba za gašenjem kogeneracijskog postrojenja tijekom godine te je jedini prekid rada ljeti, kada kogeneracija nije niti potrebna. Također, povećan je i broj radnih sati kogeneracije te on radi 4963 sati godišnje. Obojene površine iznad krivulje opterećenja predstavljaju višak proizvodnje topline u određenim periodima, koji se pohranjuje u spremniku i koristi kada je potrebniji (*peakovi* opterećenja).

Slika 43 prikazuje godišnju proizvodnju električne energije. Kao i u scenariju 2, u proizvodnji sudjeluju kogeneracijsko postrojenje s godišnjom proizvodnjom od 12386,9 MWh i fotonaponske ćelije s 1209,5 MWh. Njihova ukupna proizvodnja iznosi 13596,4 MWh i čini 63,2 % ukupnih potreba za električnom energijom (21521,5 MWh).



Slika 43. Scenarij 3: Godišnja krivulja proizvodnje električne energije



Slika 44. Scenarij 3: Krivulja trajanja električnog opterećenja

Krivulju trajanja električnog opterećenja prikazuje Slika 44. Plava površina, iznad krivulje ukupne potrošnje s gubicima, predstavlja višak električne energije u određenim periodima godine. Ta energija prodaje se u mrežu i na godišnjoj razini iznosi 2097,4 MWh.

6.4. Ekonomski pokazatelji

Izračun ekonomskih pokazatelja proveden je metodom prikazanom u poglavlju 3.7. Tablica 8 prikazuje specifične troškove proizvodnje toplinske energije.

Tablica 8. Specifični trošak proizvodnje toplinske energije

	Ref	SCENARIJ 1	SCENARIJ 2	SCENARIJ 3
Investicija [kn]	6065638	12494084	8765310	16343529
Troškovi pogona [kn]	-	93387.32	462998.5	75755.3
Troškovi održavanja [kn]	-	158070	145217	302850
Trošak el. energije [kn]	-	16886072	6958493	2436911
Trošak biomase [kn]	-	-	4483088	5596531
Trošak plina [kn]	23863465	-	-	-
Proizvedena toplina [MWh]	55443	48070.4	48898.4	50665
Kupljena toplinska energija [MWh]	0	7372,6	6544,6	4778
Trošak kupljene toplinske energije [kn]	0	1526128	1354732	989046
Ukupni trošak [kn]	29929103	31157742	22169839	25744622
Specifični trošak proizvodnje toplinske energije [kn/MWh]	**539,82**	**561,98**	**399,87**	**464,34**

S gledišta ekonomske isplativosti najmanju cijenu po jedinici proizvedene topline ima scenarij 2. Cijena MWh toplinske energije u tom slučaju iznosi 399,87 kn što je 25,9 % manje nego u referentnom scenariju. Uštede u odnosu na referentni scenarij ostvaruje i scenarij 3, a ušteda iznosi 14 %. S druge strane, scenarij 1 pokazao se 3,9 % skupljim od referentnog scenarija zbog visokih investicijskih troškova i troškova električne energije.

Tablica 9. Udio vlastite potrošnje električne energije i energija predana u mrežu

	Ref	SCENARIJ 1	SCENARIJ 2	SCENARIJ 3
Potrebna električna energija [MWh]	17696,3	43969,40	28388,90	21521,50
Proizvedena električna energija [MWh]	0	2633,40	12271,40	13596,40
Udio vlastite potrošnje [%]	**0**	**6**	**43,2**	**63,2**
Električna energija predana u mrežu [MWh]	**0**	**0,00**	**409,60**	**2.097,40**

S gledališta proizvodnje električne energije najboljim se pokazao scenarij 3. U njemu udio vlastite potrošnje iznosi 63,2 %, a u mrežu je isporučeno 2097,4 MWh električne energije. U scenariju 1, zbog malog proizvodnog kapaciteta i velike potrošnje energije dizalice topline, udio

vlastite potrošnje iznosi 6 %, pri čemu nema isporuke energije u mrežu. Iako je u scenariju 2 proizvodnja električne energije manja za 9,7 %, količina isporučene energije u mrežu gotovo je četiri puta manja zbog dužeg rada dizalice topline. Udio vlastite potrošnje u scenariju 2 iznosi 43,2 %.

6.5. Emisija CO_2

Izračun emisija CO_2 izvršen ja na način opisan u poglavlju 3.8. Emisijski faktori preuzeti su iz tablice faktora primarne energije i emisije CO_2 ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja [39]

Tablica 10. Godišnja emisija CO_2

	Ref	**SCENARIJ 1**	**SCENARIJ 2**	**SCENARIJ 3**
Prirodni plin [tCO_2]	12586.20	0.00	0.00	0.00
Električna energija [tCO_2]	0.00	9708.06	3880.70	2353.38
Biomasa [tCO_2]	0.00	0.00	-398.69	-509.06
CTS [tCO_2]	0.00	2549.30	2262.99	1652.14
Ukupno [tCO_2]	**12586.20**	**12257.35**	**5745.01**	**3496.46**

S ekološkog gledišta, najbolji rezultati postignuti su u scenariju 3. Korištenjem kogeneracijskog postrojenja na biomasu i toplinskog spremnika, umanjene su potrebe za kupnjom toplinske energije iz CTS-a i korištenjem dizalice topline. Kako su CO_2 emisijski faktori prirodnog plina i električne energije u Hrvatskoj veći od emisijskog faktora biomase, došlo je do smanjenja emisije CO_2. Ona u scenariju 3 iznosi 3496,46 tona CO_2, što je 39,15 % manje nego u scenariju 2, odnosno 71,5 % manje u odnosu na scenarij 1. U odnosu na referentno stanje, svi scenariji pokazuju smanjenje emisije CO_2. Ušteda ostvarena u scenariju 3, u odnosu na referentni scenarij, iznosi 72,2 %.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je prikazati kako zajednica potrošača (eng. *consumer*) ima mogućnosti aktivirati se i postati aktivni *prosumer* na tržištu. Fokus ovog rada nije bio na *prosumeru* kao pojedincu, već na zajednici, u ovome slučaju, naselju Trnsko. Način pripreme toplinske energije naselja uvelike je zastario u odnosu na moderne standarde. U vremenu kada se teži povećanju energetske učinkovitosti, centraliziranim toplinskim sustavima veće efikasnosti te kombiniranoj proizvodnji električne i toplinske energije, sustave grijanja naselja Trnsko čine individualni uređaji pogonjeni prirodnim plinom, ograničeni na proizvodnju samo toplinske energije, visokih troškova rada kao i nesigurnosti zbog rasta cijene prirodnog plina. Pojam *prosumera* nije striktno vezan uz proizvodnju-potrošnju električne energije, ali kako infrastruktura za proizvodnju-potrošnju toplinske energije u ovome trenutku nije na razini komercijalne primjene, u ovome radu fokusiralo se na električne *prosumere*.

Razvojem tri scenarija koja uključuju razne kombinacije tehnologija za pretvorbu obnovljivih izvora energije željela se analizirati tehno-ekonomska isplativost prijelaza jednog naselja s *consumer* razine na *prosumersku*. Također, pretpostavljena je povezanost naselja s centraliziranim toplinskim sustavom koji služi za pokrivanje vršnih opterećenja. Za prvi scenarij, odabrana je investicija na razini zajednice - dizalica topline velike snage, s ciljem zadovoljavanja toplinskih potreba, te individualni priključci solarnih kolektora i fotonaponskih ćelija. Scenarij se pokazao preskupim zbog visokih troškova električne energije, posebno tijekom zime, kada je efikasnost dizalice topline mala. Također, pokazalo se da ovaj scenarij ne ispunjava definiciju *prosumera* jer električna energija nije isporučena u mrežu.

Drugim scenarijom dodana je još jedna investicija na razini zajednice, kogeneracijsko postrojenje za istovremenu proizvodnju toplinske i električne energije. Kao gorivo odabrana je drvna biomasa. Ova kombinacija tehnologija pokazala se efikasnom u zimskom periodu, kada se zbog konstantnog rada kogeneracije ostvaruju viškovi u proizvodnji električne energije, a manje je i opterećenje na dizalicu topline, čime se ostvaruju uštede električne energije. Problem kod ovog scenarija predstavlja nemogućnost pohrane energije. To se prvenstveno očituje u proljeće i jesen, kada zbog promjenjivih temperatura kogeneracijsko postrojenje ima probleme u održavanju kontinuiteta rada, čime ne ostvaruje svoj tehnički potencijal. Ovaj scenarij pokazao

se financijski najisplativijim od sva tri scenarija, a ispunio je i definiciju *prosumera* s obzirom da je dio proizvedene električne energije predan u mrežu.

Treći scenarij ponudio je mogućnost pohrane toplinske energije u obliku ukopanog sezonskog spremnika topline volumena 100000 m^3. Kako bi se ta mogućnost maksimalno iskoristila, povećana je krovna površina pločastih solarnih kolektora 6 puta, čime su i oni, uz kogeneracijsko postrojenje i dizalicu topline, postali značajan proizvođač toplinske energije. Kombinacija solarnih kolektora i toplinskog spremnika pokazala se vrlo učinkovitom, posebice u ljetnim mjesecima, kada osim zadovoljavanja vlastitih toplinskih potreba, značajno pune i toplinski spremnik. U punjenju spremnika sudjeluje i kogeneracijsko postrojenje. Tako su izbjegnuti periodi, viđeni u drugom scenariju, kada u proljeće i jesen kogeneracijsko postrojenje često mijenja režim rada. Ovakvim načinom rada, energija isporučena u mrežu četiri je puta veća od one u scenariju 2, čime naselje postaje virtualna elektrana, što je jedna od ključnih odlika koja opisuje *prosumerske* zajednice.

Važno je napomenuti da kod ovakvih zajednica, osim tehničkih mogućnosti postrojenja, na profitabilnost cijelog sustava značajno mogu utjecati i stanovnici. Vještim upravljanjem zajednicom, promjenom navika, pohranom toplinske, ali i električne energije te njihovom prodajom u pogodnom trenutku, naselje može ostvariti i dodatan profit, sve uz minimalni negativni utjecaj na okolinu.

Svjetski lideri, ispred svih Europska unija, danas definiraju strategije za razvoj budućih energetskih mreža. Smjer za koji su se opredijelili je upravo razvoj pametnih mreža, fleksibilnih i aktivnih *prosumera*. Da je to pravi smjer, prikazuje i ovaj rad.

ZAHVALA

Ovaj rad je izrađen u sklopu projekata PROSEU (ugovor broj 764056) financiranog od strane Europske komisije kroz program Obzor 2020 i projekta RESFLEX financiranog u sklopu Programa Vlade Republike Hrvatske za poticanje istraživačkih i razvojnih aktivnosti u području klimatskih promjena za razdoblje od 01.04.2017 do 30.03.2019.

LITERATURA

[1] S. Grijalva and M. U. Tariq, "Prosumer-based smart grid architecture enables a flat, sustainable electricity industry," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur.*, 2011.

[2] A. Toffler, *The Third Wave - The Classic Study of Tomorrow*. 1980.

[3] Europski gospodarski i socijalni odbor, "Energija i energetske zadruge proizvođača-potrošača – prilike i izazovi u državama EU-a," 2016.

[4] Y. Parag and B. K. Sovacool, "Electricity market design for the prosumer era," *Nat. Energy*, vol. 1, no. 4, p. 16032, 2016.

[5] P. Järventausta, S. Repo, A. Rautiainen, and J. Partanen, "Smart grid power system control in distributed generation environment," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 42, no. 9, pp. 10–19, 2009.

[6] S. S. S. R. Depuru, L. Wang, and V. Devabhaktuni, "Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 6, pp. 2736–2742, 2011.

[7] P. Goncalves Da Silva, D. Ilic, and S. Karnouskos, "The Impact of Smart Grid Prosumer Grouping on Forecasting Accuracy and Its Benefits for Local Electricity Market Trading," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 402–410, 2014.

[8] M. Khorasany, Y. Mishra, and G. Ledwich, "Peer-to-peer market clearing framework for DERs using knapsack approximation algorithm," *2017 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, pp. 1–6, 2017.

[9] S. Karnouskos, "Demand Side Management via prosumer interactions in a smart city energy marketplace," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, pp. 1–7, 2011.

[10] U. N. Publications, "United Nations Treaty Collection," *Treaty Ref. Guid.*, no. July 1951, pp. 1–9, 2014.

[11] "PARIŠKI SPORAZUM."

[12] Hrastović Inženjering, "Pariška konferencija COP21 - Hrastović Inženjering." Dostupno na: https://www.hrastovic-inzenjering.hr/primjena-energije/energetski-clanci/energijske-

politike/item/655-pariska-konferencija-cop21.html.

[13] L. Hancher and B. M. Winters, “The Eu Winter Package: Briefing Paper,” 2017.

[14] European Commission, “Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economy and social committee, the Committee of the regions and the european investment bank - Clean energy for all Europeans,” vol. 14, no. 2, p. 3, 2017.

[15] European Commission, “Roadmap 2050,” *Policy*, no. April, pp. 1–9, 2012.

[16] Vlada Republike Hrvatske, *Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji - Zakon.hr*. 2017.

[17] EMD International, “EMD International A/S energyPRO - Simulate, analyze and optimize operations of energy plants.” Dostupno na: https://www.emd.dk/energypro/.

[18] B. Doračić, “Master’s thesis,” vol. 24, pp. 1–4, 2015.

[19] HEP, “HEP ELEKTRA d.o.o. - Tarifne stavke (cijene).” Dostupno na: http://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547.

[20] Geoportal, “GeoPortal Zagrebačke infrastrukture prostornih podataka.” Dostupno na: https://geoportal.zagreb.hr/.

[21] J. Melius, R. Margolis, and S. Ong, “Estimating Rooftop Suitability for PV : A Review of Methods , Patents , and Validation Techniques,” *NREL Tech. Rep.*, no. December, p. 35, 2013.

[22] M. Pavičević, T. Novosel, T. Pukšec, and N. Duić, “Hourly optimization and sizing of district heating systems considering building refurbishment – Case study for the city of Zagreb,” *Energy*, vol. 137, pp. 1264–1276, 2017.

[23] www.hrote.hr, “HROTE - Hrvatski operator tržišta energije - Model tržišta.” Dostupno na: http://www.hrote.hr/o-nama.

[24] K. Appunn, “Setting the power price: the merit order effect | Clean Energy Wire,” *23 01*, 2015. Dostupno na: https://www.cleanenergywire.org/factsheets/setting-power-price-merit-order-effect.

[25] CROPEX, “Hrvatska burza električne energije.” Dostupno na: https://www.cropex.hr/hr/.

[26] Geowatt, “Technology - Geowatt.” Dostupno na: http://geowatt.biz/en/technology/surface.

[27] EMD International, “energyPRO - User Guide,” 2001.

[28] M. Pavičevič, “Diplomski rad,” 2008.

[29] M. Kloess, K. Zach, “Bulk electricity storage technologies for load-leveling operation - An economic assessment for the Austrian and German power market,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 59, pp. 111–122, 2014.

[30] M. Pavičevič, T. Novosel, T. Pukšec, N. Duić, “Analiza slučaja za grad Zagreb.”

[31] K. Gerin, O.; Bleys, B.; De Cuyper, “Seasonal variation of hot and cold water consumption in apartment buildings,” *CIBW06 Symp.*, no. 1, pp. 1–9, 2014.

[32] A. Lovrak, “Diplomski rad,” 2017.

[33] “ENTSO-E.” Dostupno na: https://www.entsoe.eu/.

[34] Državni zavod za statistiku, “Popis stanovništva 2011,” 2011. Dostupno na: https://www.dzs.hr/hrv/censuses/census2011/censuslogo.htm.

[35] Danish Energy Agency and Energinet, “Technology Data for Individual Heating Installations,” 2016.

[36] Energetski institut Hrvoje Požar, “Energija u hrvatskoj 2015,” 2014.

[37] R. Pašičko, D. Kajba, J. Domac, “Konkurentnost šumske biomase u Hrvatskoj u uvjetima tržišta CO2 emisija,” *CXXXIII*, vol. 425, pp. 425–438, 2009.

[38] “JOHANNEUM RESEARCH Interim Report 19,” *Ratio*.

[39] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, “Faktori primarne energije i emisija CO 2,” p. 2014, 2014.