

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



***Istraživanje puteva energetske tranzicije -
međuviznost "power-to-X" tehnologija,
tehnologija odgovora potrošnje i povezivanja tržišta
energijom – INTERENERGY***

***D2.3 – Analiza scenarija za određivanje
optimalnog odnosa tehnologija odgovora potrošnje
i „power-to-x“ tehnologija***

Zagreb, 2022. godina

Projektni tim:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Prof. dr. sc. Ingo Stadler

Prof. dr. sc. Henrik Lund

Izv. prof. dr. sc. Iva Ridjan Skov

Prof. dr. sc. Fei Wang

Prof. dr. sc. Felipe Feijoo

Antun Pfeifer, mag. ing. mech.

Luka Herc, mag. ing. mech.

SADRŽAJ

1. POPIS SLIKA.....	II
2. POPIS TABLICA	III
3. Sažetak.....	1
4. Summary.....	3
5. Energetski sustav Republike Hrvatske	5
1. Postojeći kapaciteti	5
2. Električna energija	9
3. Sektor grijanja	13
4. Sektor industrije	16
5. Sektor transporta	17
6. Zahtjevi	18
6. Analiza izgradnje kapaciteta.....	19
7. Reference	32

1. POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovna potražnja za električnom energijom.....	10
Slika 2. Normalizirana proizvodnja iz solarne elektrane HR_SolarPP	11
Slika 3. Normalizirana proizvodnja iz solarne elektrane HR_SolarHigh	11
Slika 4. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR_WindPP	12
Slika 5. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR_WindPP1.....	12
Slika 6. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR_WindPP2.....	13
Slika 7. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR_WindPP3.....	13
Slika 8. Potražnja za toplinskom energijom u centraliziranom toplinskom sustavu baziranom na TE-TOZagreb	14
Slika 9. Potražnja za toplinskom energijom u centraliziranom toplinskom sustavu baziranom na EL-TOZagreb	15
Slika 10. Potražnja za toplinskom energijom u centraliziranom toplinskom sustavu baziranom na TE-TOOsijek	15
Slika 11. Potražnja za toplinskom energijom u individualnim toplinskim sustavima	16
Slika 12. Potražnja energijom u sektoru industrije	16
Slika 13. Normalizirana potražnja energije u sektoru prometa	17
Slika 14. Dostupnost električnog vozila na punjaču	17
Slika 15. Ograničenja emisija i udjela obnovljivih izvora energije [7].....	18
Slika 16. Proizvodnja električne energije.....	20
Slika 17. Satna distribucija proizvodnje električne energije	21
Slika 18. Rad Power to X tehnologija	25
Slika 19. Potrošnja električne energije pojedinih Power-to-X tehnologija	26
Slika 20. Energija u industriji.....	27
Slika 21. Sektor transporta	28
Slika 22. Udjeli primarne energije	29
Slika 23. Troškovi sustava po godinama.....	30
Slika 24. Usporedba ostvarenih emisija i udjela OIE u odnosu na ciljeve.....	31
Slika 25. CEEP.....	31

2. POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci o akumulacijskim hidroelektranama [5].....	5
Tablica 2. Podaci o reverzibilnim hidroelektranama	6
Tablica 3. Podaci o protočnim hidroelektranama.....	6
Tablica 4. Podaci o termoelektranama na biomasu, ugljen i nuklearnu energiju [5]	7
Tablica 5. Podaci o termoelektranama na loživo ulje i prirodni plin [5]	8
Tablica 6. Kapaciteti varijabilnih obnovljivih izvora energije [6]	9
Tablica 7. Investicije u proizvodne kapacitete	19
Tablica 8. Investicije u kotlove i dizalice topline u individualnim toplinskim sustavima	22
Tablica 9. Investicije u kotlove i dizalice topline u centraliziranim toplinskim sustavima	23
Tablica 10. Investicija u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije.....	24

3. Sažetak

Ovaj izvještaj daje pregled rezultata simulacija provedenih u programu H2RES [1] na temelju energetskeg sustava Republike Hrvatske. Proveden je scenarij po uzoru na ciljeve energetskeg razvitka Europske Unije u vidu emisija CO₂. Postavlja se cilj dosezanja smanjenja emisija za 55 % u odnosu na razine iz 1990. do 2030., te dostizanje klimatske neutralnosti do 2050 [2]. također se zadaje ograničenje na udio električne energije iz obnovljivih izvora energije. Time se sadašnji udo od oko 45 % postepeno povećava do 100 % 2050. U vidu ograničenja izgradnje kapaciteta se koriste ograničenja iz Strategije energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. Koriste se ograničenja izgradnje kapaciteta energije vjetra od 9000 MW te kapaciteta fotonapona (PV) od 8000 MW [3]. Iako su ovo relativno niska ograničenja u odnosu na ukupne potencijale Republike Hrvatske, uspješno su dosegnuti ciljevi potpune dekarbonizacije sektora proizvodnje električne energije, grijanja, transporta i industrije.

Dodatno ograničenje koje se stavlja na model je u brzini izgradnje pojedinih kapaciteta kako bi se održao realističan razvoj sustava. Primjerice, postavljaju se ograničenja u brzini adaptacije elektrifikacije transporta kao rezultat inercije industrijskih procesa i spore izgradnje novih proizvodnih kapaciteta. Naposljetku, najbitnije je ograničenje troškova sustava koji su predstavljeni putem funkcije cilja. Zadatak modela je minimizacija vrijednosti funkcije cilja. Potrebno je napomenuti da se minimizira ukupan iznos troškova. Time se omogućuju veliki iznosi troškova u pojedinim godinama. Visoki iznosi su uzrokovani investicijama u nove proizvodne kapacitete.

Uveden je također i parametar kojim se ograničava prekomjerna proizvodnja električne energije u sustavu (CEEP). Njegova vrijednost se ograničava na 5 % kako ne bi došlo do velikih količina energije koje varijabilni obnovljivi izvori energije (VOIE) proizvedu, a ne može se potrošiti [4]. Visoke vrijednosti ovog parametra bi ukazivale na nestabilnost sustava i nemogućnost integracije svih kapaciteta.

Kod razvoja sustava se razmatra primjena „Power to X“ tehnologija i tehnologija odgovora potrošnje. Rezultati prikazuju potrebu za visokim kapacitetima navedenih tehnologija kako bi se postigli traženi rezultati. Osim samog pružanja fleksibilnosti, korištenje „Power-to-X“ tehnologija i tehnologija odgovora potrošnje omogućuje postizanje izbacivanja fosilnih goriva.

Primjerice, u sektoru industrije se dekarbonizacija provodi uvođenjem električne energije, vodika i ostalih proizvoda zasnovanih na vodik. Njihova upotreba ujedno pomaže i u dekarbonizaciji.

4. Summary

This report provides an overview of the simulation results conducted in the H2RES program [1] based on the energy system of the Republic of Croatia. A scenario based on the European Union's energy development goals in the form of reduction of CO₂ emissions was implemented. The goal is to achieve reduction of emissions by 55% compared to the levels from 1990 to 2030, and to achieve climate neutrality by 2050 [2]. A limit is also set on the share of electricity from renewable energy sources. The current limitation of about 45% is gradually increasing to 100% in 2050. In the form of capacity building restrictions, the restrictions from the Energy Development Strategy of the Republic of Croatia until 2030 with an outlook to 2050 are used. The strategy limits the installations of wind power to 9000 MW and PV to 8000 MW [3]. Although these are relatively low constraints in relation to the overall potential of the Republic of Croatia, the model has successfully achieved the goals of complete decarbonisation of the electricity generation, heating, transport, and industry sectors.

An additional limitation that is placed on the model is the rate of installing the capacities in order to maintain a realistic development of the system. For example, constraints are placed on rapid adaptations of transport electrification as a result of the inertia of industrial processes and the slow construction of new production facilities. Finally, the most important thing is to limit the costs of the systems represented by the goal functions. The task of the model is to minimize the value of the goal function. It should be noted that the total value of costs is minimized. This does not forbid large values of the costs in individual years. High values are caused by investments in new production capacities.

A parameter limiting excessive electricity generation in the system (CEEP) has also been introduced. Its value is limited to 5% in order to avoid large amounts of energy that variable renewable energy sources (VOIE) produce, and which cannot be consumed [4]. High values of this parameter would indicate system instability of the system and inability to integrate all capacities.

The development of the system considers the application of "Power to X" technology and demand-response technology. The results show the need for big capacities of these technologies in order to achieve the required results. In addition to providing flexibility, the use of "Power-to-X" technology and demand-response technology allows fossil fuels to be replaced. For

example, in the industrial sector, decarbonisation is carried out by introducing electricity, hydrogen and other hydrogen-based products. Their use also helps in decarbonization.

5. Energetski sustav Republike Hrvatske

Ovaj izvještaj daje pregled rezultata simulacija provedenih u programu H2RES na temelju energetskog sustava Republike Hrvatske. Koriste se povijesni podaci kako bi se kalibrirao model i dale početne vrijednosti.

1. Postojeći kapaciteti

Model razmatra nadogradnju kapaciteta te dekomisiju starijih jedinica. Tablica 1. prikazuje osnovne podatke o postojećim kapacitetima akumulacijskih hidroelektrana. Prikazani su podaci o instaliranim kapacitetima, vrsti postrojenja, podaci o životnom vijeku, učinkovitosti te pogonskim karakteristikama postrojenja. Također, prikazani su podaci o akumulaciji. Vidljivo je da nisu predviđene nove instalacije ove vrste postrojenja. Iz istog razloga su stavljeni podaci o trošku investicije kao beskonačni.

Tablica 1. Podaci o akumulacijskim hidroelektranama [5]

Ime	HEZakucac	HESenj	HEDubrovnik_HR	HEVinodol	HEPeruca	HESklope
Kapacitet [MW]	538	216	117	90	60	22.5
Gorivo	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro
Početak dekomisije	50	50	50	50	50	50
Vijek trajanja	50	50	50	50	50	50
Početak dekomisije novosagrađenih	50	50	50	50	50	50
Preostali kapacitet nakon dekomisije	1	1	1	1	1	1
Maksimalna investicija po simuliranoj godini [MW]	0	0	0	0	0	0
Maksimalna snaga u svakom trenutku [MW]	538	216	117	90	60	22.5
Faktor opterećenja	1	1	1	1	1	1
Učinkovitost	0.899312	0.895055	0.899442	0.847778	0.85	0.849474
Trošak investicije [€/MW]	99999999	99999999	99999999	99999999	99999999	99999999
Trošak promjene snage [€/MW]	0	0	0	0	0	0
CO2 intenzitet	0	0	0	0	0	0
Vrsta tehnologije	HDAM	HDAM	HDAM	HDAM	HDAM	HDAM
Brzina promjene snage [%/min]	1	1	1	1	1	1
Kapacitet pohrane akumulacije	2047	143008	821991	2172	69289	20928

Tablica 2. prikazuje podatke o reverzibilnim hidroelektranama. Tablica također prikazuje podatke o instaliranim kapacitetima, vrsti postrojenja, podaci o životnom vijeku, učinkovitosti, pogonskim karakteristikama postrojenja i podacima o akumulaciji. Dodatno u odnosu na

podatke o akumulacijskim hidroelektranama, ova tablica prikazuje podatke o učinkovitosti i snazi postrojenja u pumpnom režimu rada.

Tablica 2. Podaci o reverzibilnim hidroelektranama

Ime	RHEVelebit	RHEOrlovac	RHEVinodol
Kapacitet [MW]	276	237	5.4
Gorivo	Hydro	Hydro	Hydro
Početak dekomisije	50	50	50
Vijek trajanja	50	50	50
Početak dekomisije novosagrađenih	40	40	40
Preostali kapacitet nakon dekomisije	1	1	1
Maksimalna investicija po simuliranoj godini [MW]	0	0	0
Maksimalna snaga u svakom trenutku [MW]	276	237	5.4
Faktor opterećenja	1	1	1
Učinkovitost	0.906981	0.908234	0.899739
Trošak investicije [€/MW]	1000000	1000000	1000000
Trošak promjene snage [€/MW]	0	0	0
CO2 intenzitet	0	0	0
Vrsta tehnologije	HPHS	HPHS	HPHS
Brzina promjene snage [%/min]	1	1	1
Kapacitet pohrane akumulacije	14800	809761	4049
Gubitak pohrane	0.016216	1.26E-05	0.001704
Maksimalna snaga punjenja [MW]	240	10.2	6.9
Učinkovitost procesa pumpanja	0.75	0.75	0.75

Tablica 3. prikazuje podatke o protočnim hidroelektranama. Dodatna veličina u odnosu na prijašnje tablice je prikaz očekivanog faktora opterećenja postrojenja.

Tablica 3. Podaci o protočnim hidroelektranama

Ime	HEVarazdin	HEDubrava	HECakovec	HEGojak	HEKraljevac	HELesce	HEDale	HERijeka	mHEHrvatska	HEMiljacka
Kapacitet [MW]	94.6	79.78	77.44	55.5	46.4	41.2	40.8	36.8	27.393	20
Gorivo	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro	Hydro
Početak dekomisije	50	50	50	50	50	50	50	15	15	15
Vijek trajanja	50	50	50	50	50	50	50	25	25	25
Početak dekomisije novosagrađenih	40	40	40	40	40	40	40	20	20	20
Preostali kapacitet nakon dekomisije	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Maksimalna investicija po simuliranoj godini [MW]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Maksimalna snaga u svakom trenutku [MW]	94.6	79.78	77.44	55.5	46.4	41.2	40.8	36.8	27.393	20
Faktor opterećenja prema dostupnoj snazi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Stvarni faktor opterećenja	0.52	0.5	0.47	0.37	0.12	0.24	0.34	0.17	0.38	0.45
Učinkovitost	0.860732	0.929425	0.902185	0.841136	0.796275	0.896494	0.900228	0.839831	0.840659	0.599628
Trošak investicije u 2020. [€/MW]	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
Trošak promjene snage [€/MW]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2 intenzitet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vrsta tehnologije	HROR	HROR	HROR	HROR	HROR	HROR	HROR	HROR	HROR	HROR
Brzina promjene snage [%/min]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Podatke o termoelektranama prema korištenim gorivima prikazuju Tablica 4. i Tablica 5, dok Tablica 6 prikazuje kapacitete varijabilnih obnovljivih izvora energije (VOIE). Predviđena je mogućnost investicije u kogeneracijska postrojenja i u postrojenja na biomasu. Nijedno od postrojenja koje prikazuje Tablica 4. nema predviđenu opskrbu centraliziranog toplinskog sustava toplinskom energijom.

Tablica 4. Podaci o termoelektranama na biomasu, ugljen i nuklearnu energiju [5]

Ime	Bovis	mTEOJakusevac	PZOsatina	TEBiomassHR	NEKrskoHR	TEPlomin1	TEPlomin2
Kapacitet [MW]	1	2.036	1	24.6	348	110	192
Gorivo	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Nuklearna energija	Ugljen	Ugljen
Početak dekomisije	15	15	15	15	15	15	15
Vijek trajanja	25	25	25	25	25	25	25
Početak dekomisije novosagrađenih	20	20	20	20	20	20	20
Preostali kapacitet nakon dekomisije	1	1	1	1	0	0	0
Maksimalna investicija po simuliranoj godini [MW]	50	50	50	50	0	0	0
Maksimalna snaga u svakom trenutku [MW]	50	60	1	74.6	348	110	192
Faktor opterećenja prema dostupnoj snazi	1	1	1	1	1	1	1
Učinkovitost	0.35	0.38	0.35	0.45	0.57	0.4	0.42
Trošak investicije u 2020. [€/MW]	3400000	3400000	3400000	3400000	1000000	1000000	1000000
Trošak promjene snage [€/MW]	0.5	0.5	0.5	0.5	1.8	1.8	1.8

CO2 intenzitet	0.123	1.062	0.123	0.123	0	1.062	1.062
Vrsta tehnologije	ICEN	GTUR	ICEN	STUR	STUR	STUR	STUR
Brzina promjene snage [%/min]	20	10	20	20	2.5	2.5	2.5
Kogeneracija	N	N	N	N	N	N	N

Tablica 5. prikazuje podatke o termoelekttranama na loživo ulje i prirodni plin. Vidljivo je da dio termoelektrana iz ove grupe sudjeluje u opskrbi centraliziranih toplinskih sustava toplinskom energijom. Proizvodnja toplinske energije je definirana putem omjera toplinske i električne energije. Također, definiran je kapacitet pohrane energije, gubitak u proizvodnji električne energije kao i kapacitet pražnjenja spremnika toplinske energije.

Tablica 5. Podaci o termoelekttranama na loživo ulje i prirodni plin [5]

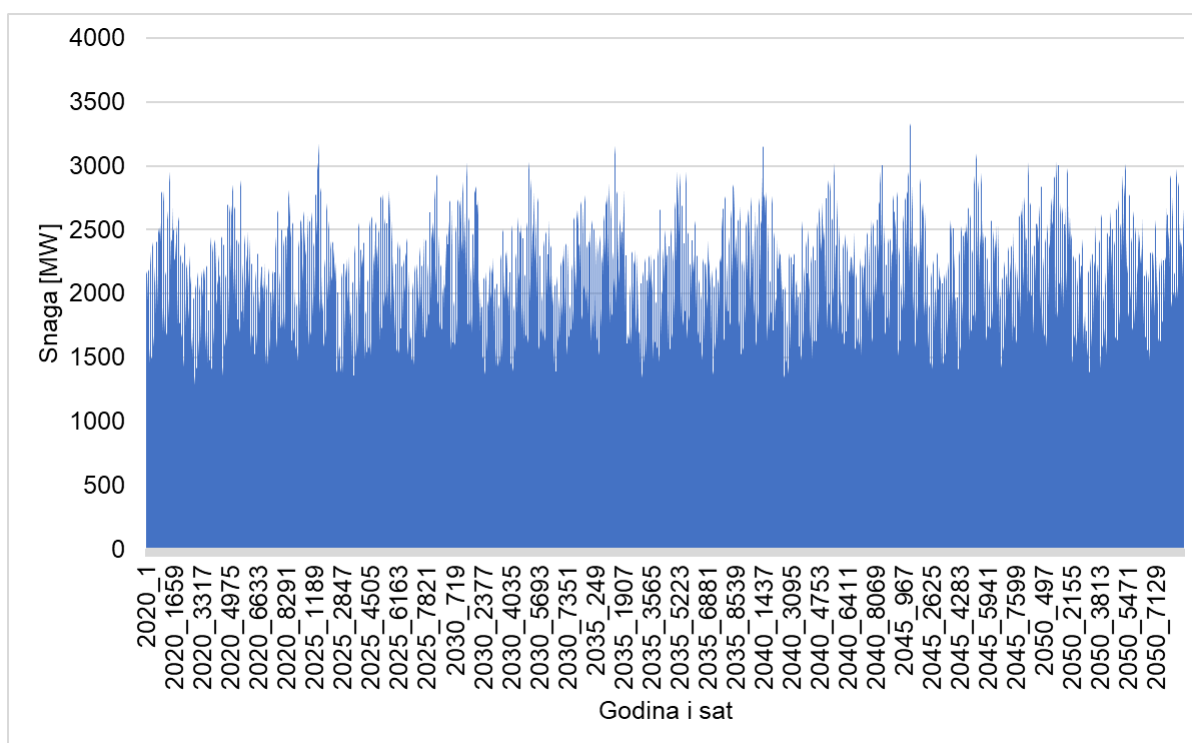
Ime	TERijeka	TESisak	TE-TOOsijek	TE-TOZagreb	EL-TOZagreb	KTEJertovec
Kapacitet [MW]	303	396	90	440	90	78
Gorivo	Oil	Oil	Gas	Gas	Gas	Gas
Početak dekomisije	50	15	15	15	15	15
Vijek trajanja	50	25	25	25	25	25
Početak dekomisije novosagrađenih	40	20	20	20	20	20
Preostali kapacitet nakon dekomisije	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1
Maksimalna investicija po simuliranoj godini [MW]	0	0	50	50	50	50
Maksimalna snaga u svakom trenutku [MW]	303	396	140	490	90	150
Faktor opterećenja prema dostupnoj snazi	1	1	1	1	1	1
Učinkovitost	0.52	0.57	0.393013	0.306977	0.15	0.36
Trošak investicije u 2020. [€/MW]	1000000	1000000	1200000	1200000	1200000	1200000
Trošak promjene snage [€/MW]	1.8	1.8	0.5	0.5	0.5	0.5
CO2 intenzitet	0.517	0.517	0.398	0.398	0.398	0.398
Vrsta tehnologije	STUR	STUR	STUR	STUR	STUR	COMC
Brzina promjene snage [%/min]	2.5	2.5	6	6	6	6
Kogeneracija	N	N	Y	Y	Y	N
Kapacitet pohrane energije			750	750	750	
Gubitak pohrane			0.03	0.03	0.03	
Omjer proizvodnje toplinske i električne energije			0.647482	0.517647	0.2	
Gubitak snage kod proizvodnje toplinske energije			0.18	0.18	0.18	
Maksimalna snaga ispusta pohrane u CTS			139	849	450	

Tablica 6. Kapaciteti varijabilnih obnovljivih izvora energije [6]

Ime	HR_WindPP	HR_SolarPP	HR_SolarHigh	HR_WindPP1	HR_WindPP2	HR_WindPP3
Kapacitet [MW]	104	20	40	104	104	104
Gorivo	Wind	Solar	Solar	Wind	Wind	Wind
Početak dekomisije	15	15	15	15	15	15
Vijek trajanja	25	25	25	25	25	25
Početak dekomisije novosagrađenih	20	20	20	20	20	20
Preostali kapacitet nakon dekomisije	1	1	1	1	1	1
Maksimalna investicija po simuliranoj godini [MW]	5000	3000	3000	3000	3000	3000
Maksimalna snaga u svakom trenutku [MW]	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Faktor opterećenja prema dostupnoj snazi	1	1	1	1	1	1
Stvarni faktor opterećenja	0.2	0.14	0.2	0.24	0.26	0.2
Učinkovitost	1	1	1	1	1	1
Trošak investicije u 2020. [€/MW]	1100000	600000	600000	1100000	1100000	1100000
Trošak promjene snage [€/MW]	0	0	0	0	0	0
CO2 intenzitet	0	0	0	0	0	0
Vrsta tehnologije	WTON	PHOT	PHOT	WTON	WTON	WTON
Brzina promjene snage [%/min]	100	100	100	100	100	100

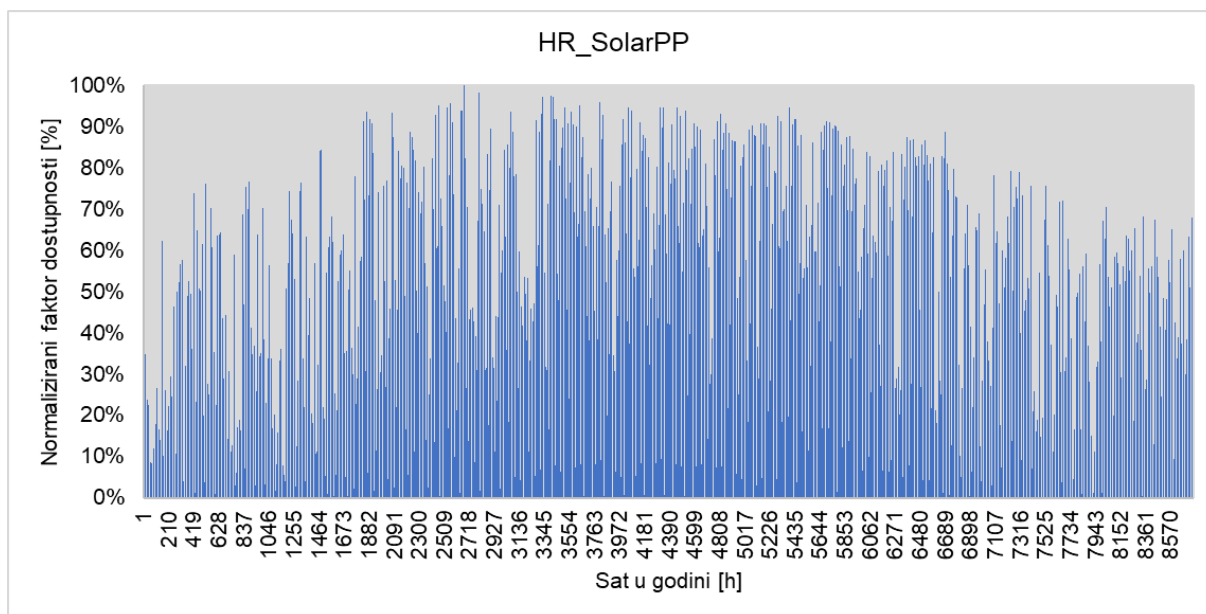
2. Električna energija

U sektoru potrošnje električne energije se pretpostavlja se da će električni uređaji postati energetski učinkovitiji, dok se istovremeno očekuje korištenje više električnih uređaja. Pretpostavlja se da je povećanje potražnje uglavnom uzrokovano povećanjem potražnje za hlađenjem. Stoga se pretpostavlja blago povećanje osnovne potražnje od 0.2 % godišnje. Time se osnovna potražnja od 18 TWh u 2020. povećava na 19.1 TWh u 2050 [7][8]. Osnovnoj potražnji za električnom energijom dodaje se dodatna potražnja koja se sastoji od potražnje električnom energijom prouzrokovana korištenjem električnih vozila, električnim grijanjem, skladištenjem energije i proizvodnjom vodika. Ove vrste potražnje su djelomično fleksibilne i koriste se za istiskivanje fosilnih goriva i pomoć pri integraciji VRES-a. Distribucija potražnje za električnom energijom potječe iz Entso-e. Potrebno je napomenuti da se većina ukupnog povećanja potražnje električne energije očekuje od novouvedenih „powerto-X“ opcija. Slika 1. prikazuje distribuciju osnovne potražnje za električnom energijom.



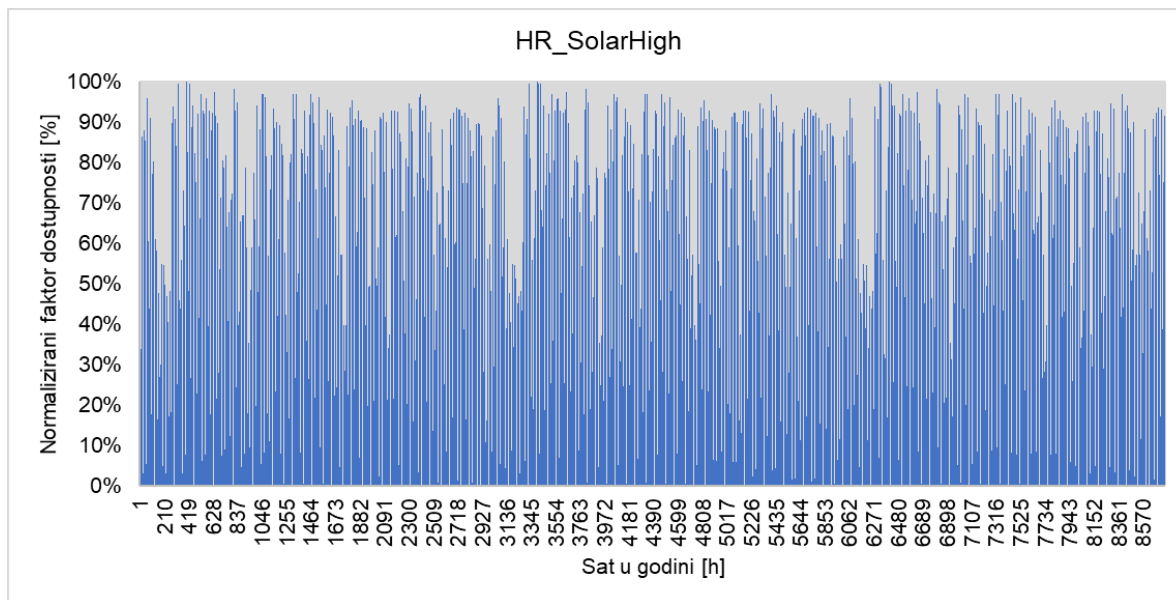
Slika 1. Osnovna potražnja za električnom energijom

Sljedeće slike prikazuju normalizirane krivulje proizvodnje električne energije iz varijabilnih obnovljivih izvora energije. Prikazano je nekoliko slika koje se odnose na proizvodnju iz energije vjetra i energije sunca. Međusobno se razlikuju o korištenoj geografskoj lokaciji za izvor podataka što rezultira različitim ostvarivim faktorima opterećenja. Slika 2. prikazuje krivulju proizvodnje energije iz energije sunca. Promatrana lokacija prikazuje značajnu varijabilnost u proizvodnji te posljedično rezultira s faktorom opterećenja proizvodnog postrojenja od 14 %.



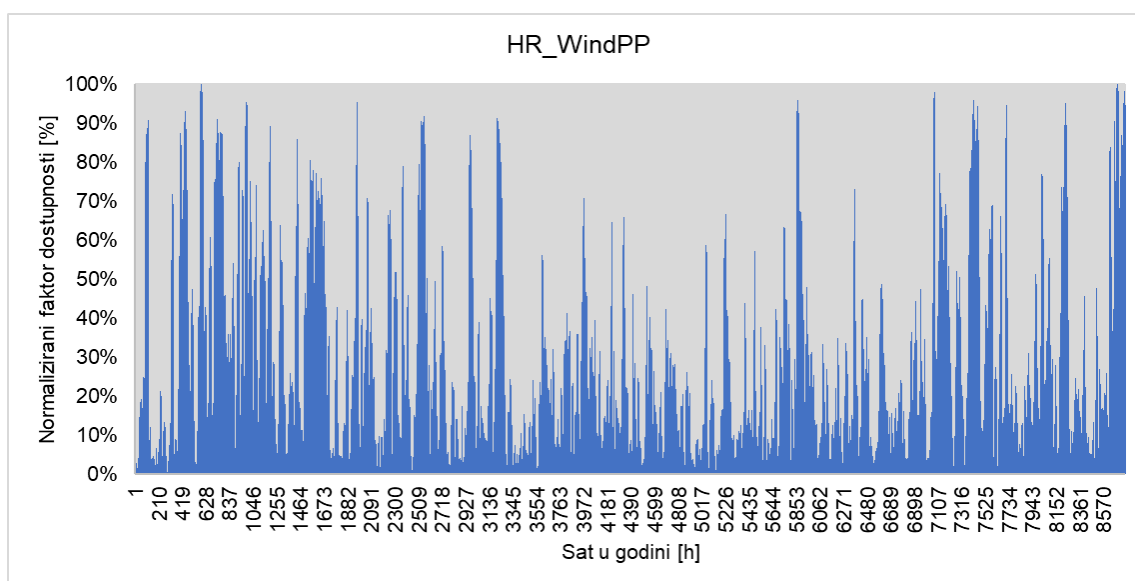
Slika 2. Normalizirana proizvodnja iz solarne elektrane HR_SolarPP

Lokaciju s većim potencijalom proizvodnje iz energije sunca prikazuje Slika 3. vidljiva je ujednačenija proizvodnja tokom godine u odnosu na SolarPP što rezultira faktorom opterećenja od 20 %.



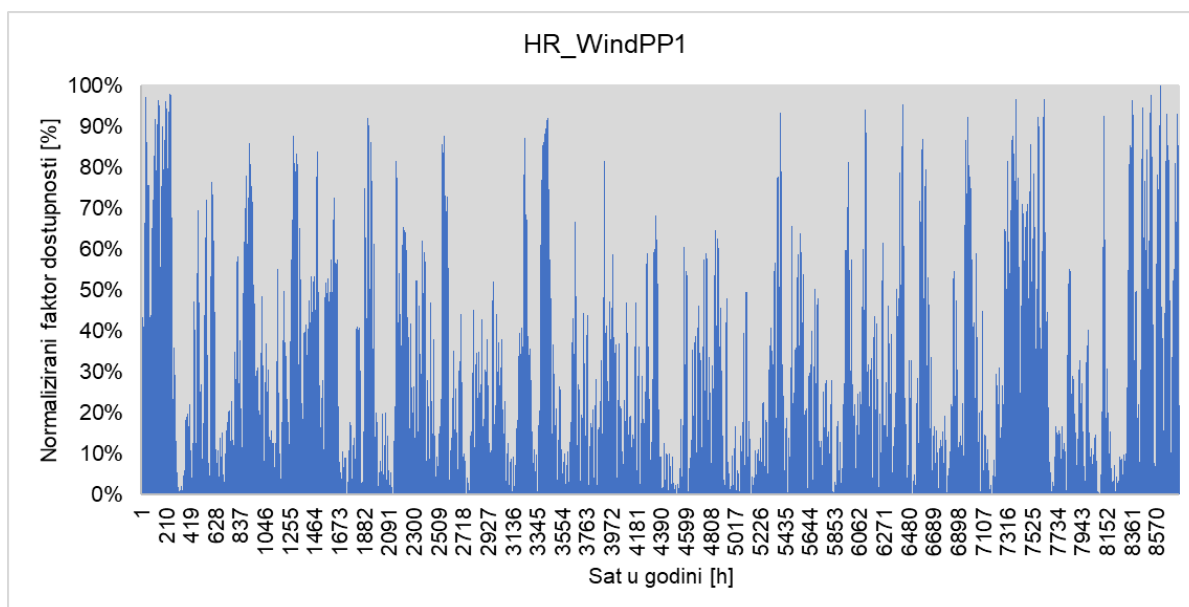
Slika 3. Normalizirana proizvodnja iz solarne elektrane HR_SolarHigh

Energija vjetra je modelirana putem 4 krivulje. Prva krivulja koja predstavlja WindPP postrojenje ima faktor opterećenja od 20 %. Navedenu krivulju prikazuje Slika 6. Vidljiva je izražena varijacija proizvodnje, posebice razlika između proizvodnje tokom zime i ljeta.



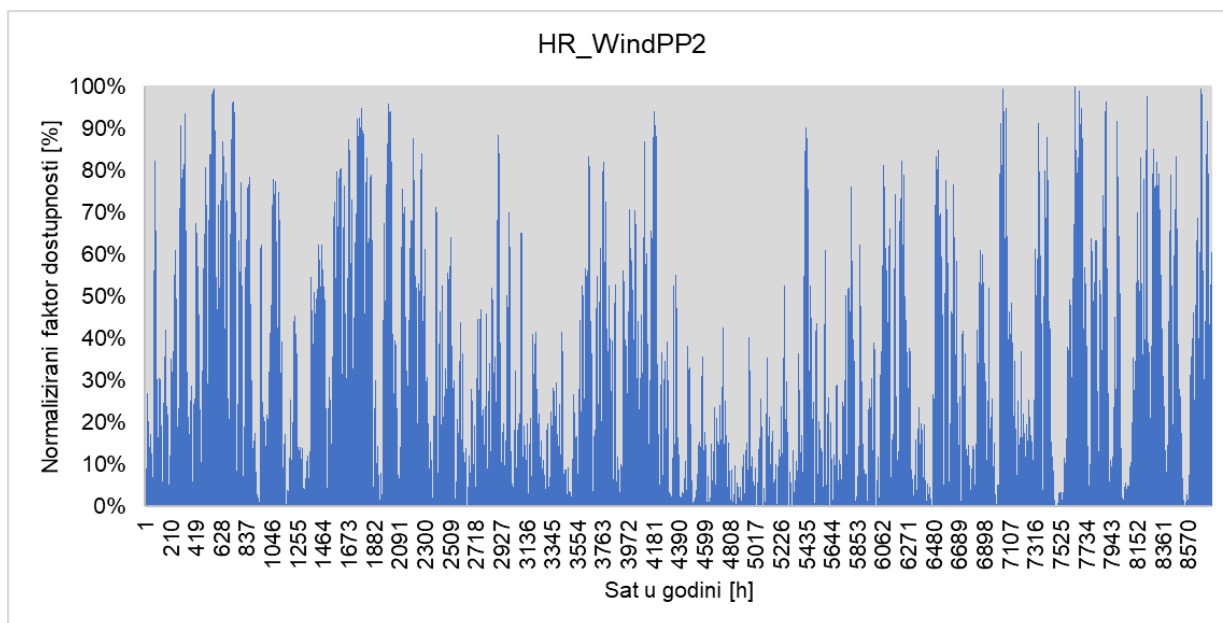
Slika 4. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR_WindPP

Krivulju s nešto boljim faktorom opterećenja od 24 % prikazuje Slika 7. valja primjetiti da gotovo ni u jednom trenutku ne dolazi do potpunog prestanka proizvodnje, već samo do smanjenja.



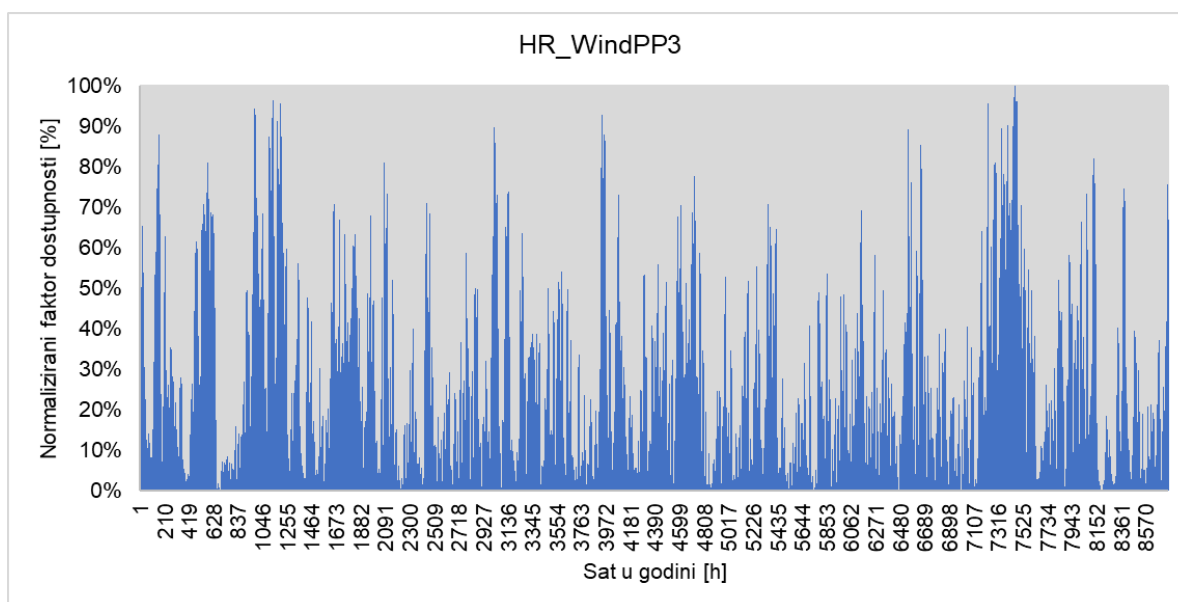
Slika 5. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR_WindPP1

Krivulju s najvišim faktorom opterećenja od 26 % prikazuje Slika 6. Ipak, i ova krivulja prikazuje smanjenje proizvodnje tokom ljeta.



Slika 6. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR_WindPP2

WindPP3 također ima faktor opterećenja od 20 %, ali predstavlja manje izraženu sezonalnost u odnosu na krivulju WindPP. Slika 7 prikazuje navedenu krivulju.



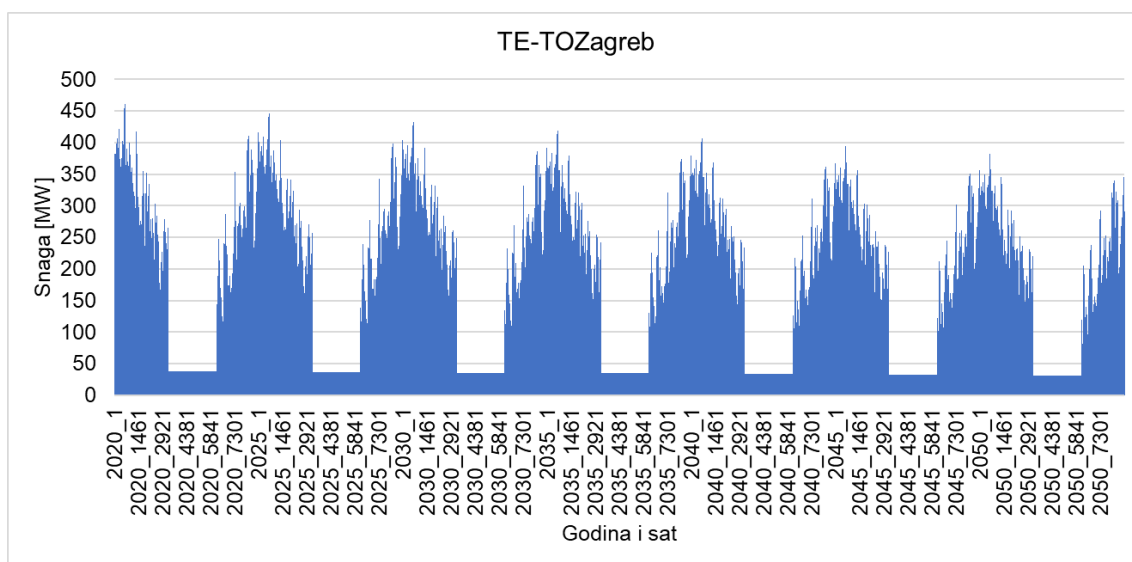
Slika 7. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR_WindPP3

3. Sektor grijanja

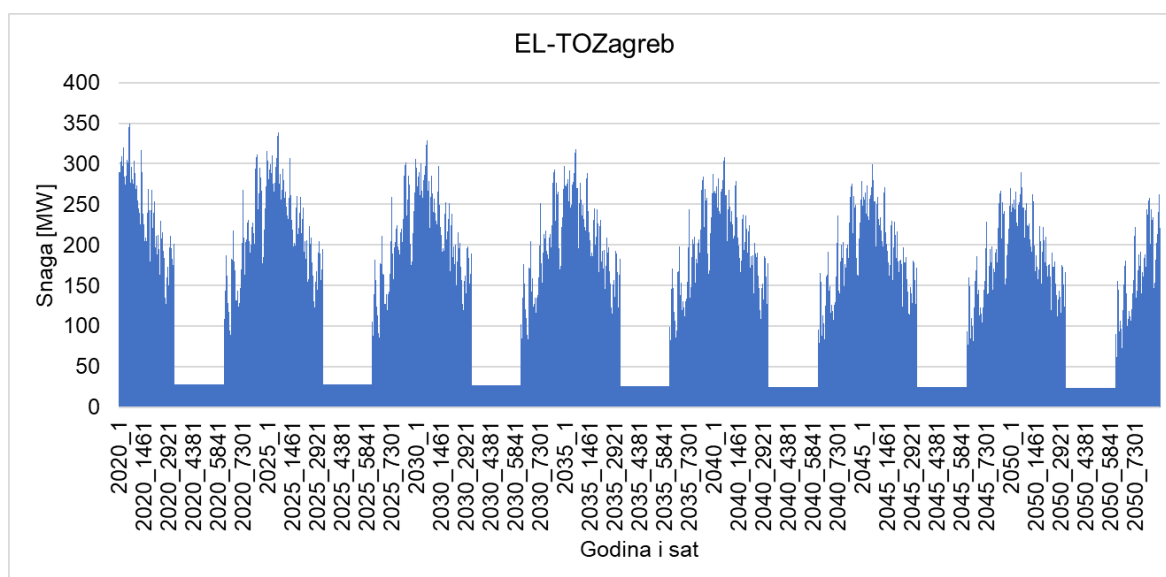
Sektor grijanja podijeljen je na 4 dijela, od kojih 3 pripadaju sustavima daljinskog grijanja, a jedan pripada individualnim sustavima grijanja. Sustavi daljinskog grijanja pokrivaju približno

10 % potreba za toplinom. Svaka toplana ima vlastite ulazne podatke koji se sastoje od proizvodnih kapaciteta, učinkovitosti i distribucije potražnje za toplinom. Potražnja se svake godine smanjuje za 1 % što rezultira smanjenjem od 26 % do 2050. Modelirani su sustavi vezani na TE-TO Zagreb, EL-TO Zagreb i TE-TO Osijek.

Slika 8. prikazuje potražnju za toplinskom energijom u centraliziranom toplinskom sustavu vezanom na TE-TO-Zagreb. Zagrebački CTS je modeliran kao dva odvojena sustava zbog ograničenja u trenutnoj verziji modela. Vidljivo je smanjenje opterećenja kroz godine kao i razlika između sezona grijanja i perioda izvan sezone grijanja. Opterećenje vidljivo izvan sezone grijanja predstavlja potražnju za potrošnom toplom vodom. Sličan prikaz je vidljiv i za EL-TO-Zagreb, samo s nižim vrijednostima. Također, ista krivulja temperaturnih distribucija je korištena u oba slučaja za određivanje satnih distribucija potražnje za toplinskom energijom jer se oba sustava nalaze u istom gradu. Slika 9. prikazuje navedene rezultate.

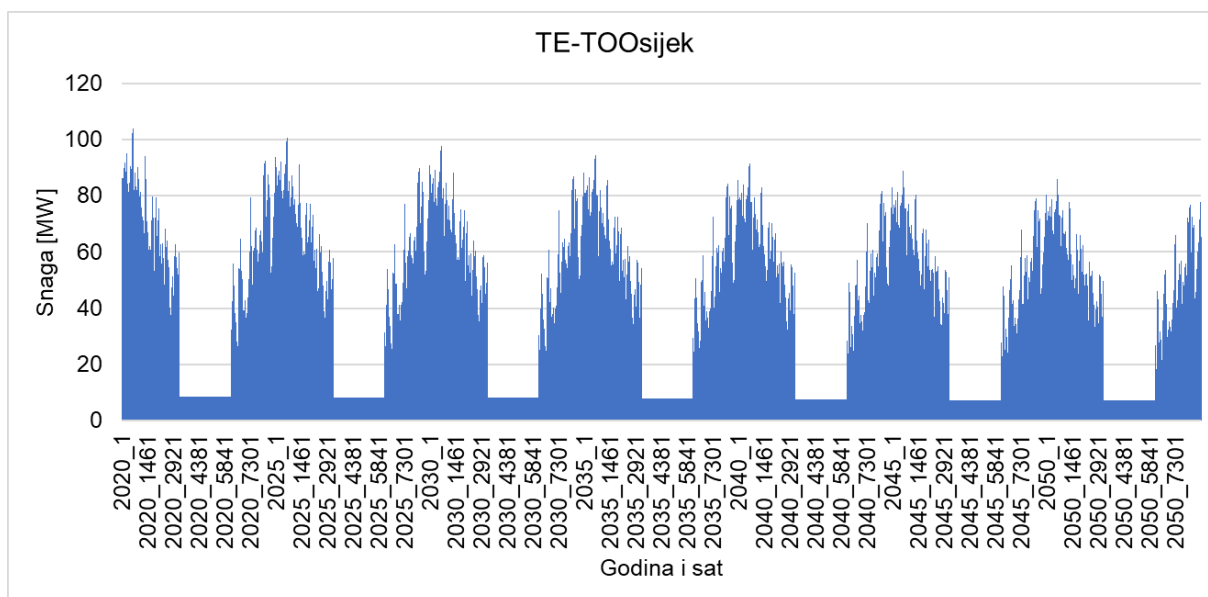


Slika 8. Potražnja za toplinskom energijom u centraliziranom toplinskom sustavu baziranom na TE-TOZagreb



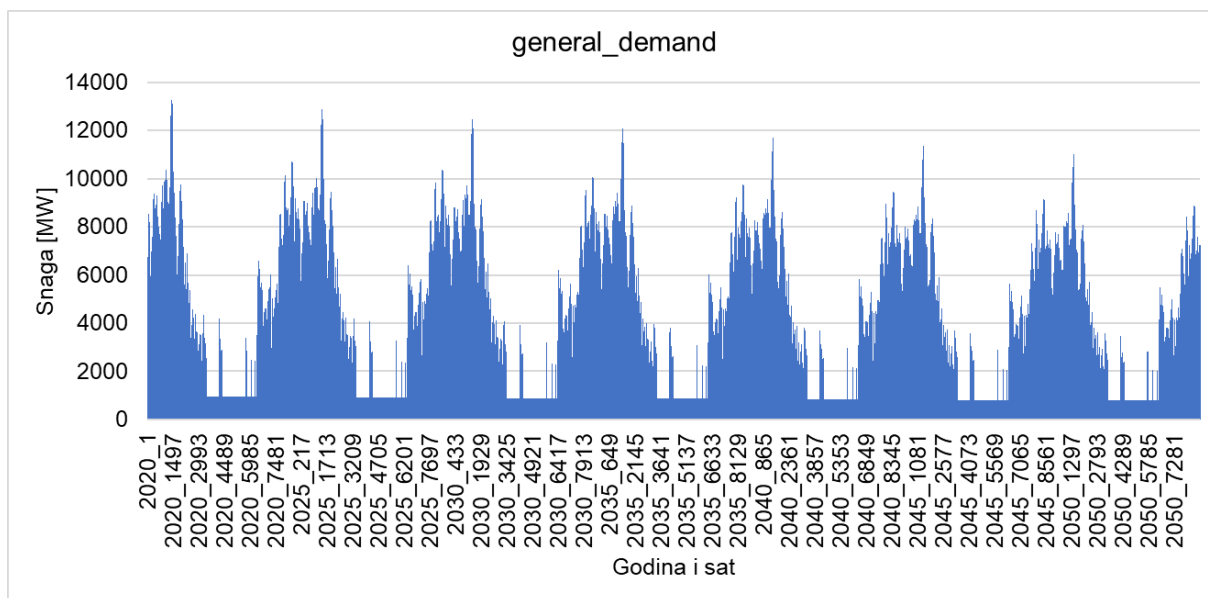
Slika 9. Potražnja za toplinskom energijom u centraliziranom toplinskom sustavu baziranom na EL-TOZagreb

Istom metodom je izrađena i krivulja za centralizirani toplinski sustav u Osijeku koji prikazuje Slika 10.



Slika 10. Potražnja za toplinskom energijom u centraliziranom toplinskom sustavu baziranom na TE-TOOsijek

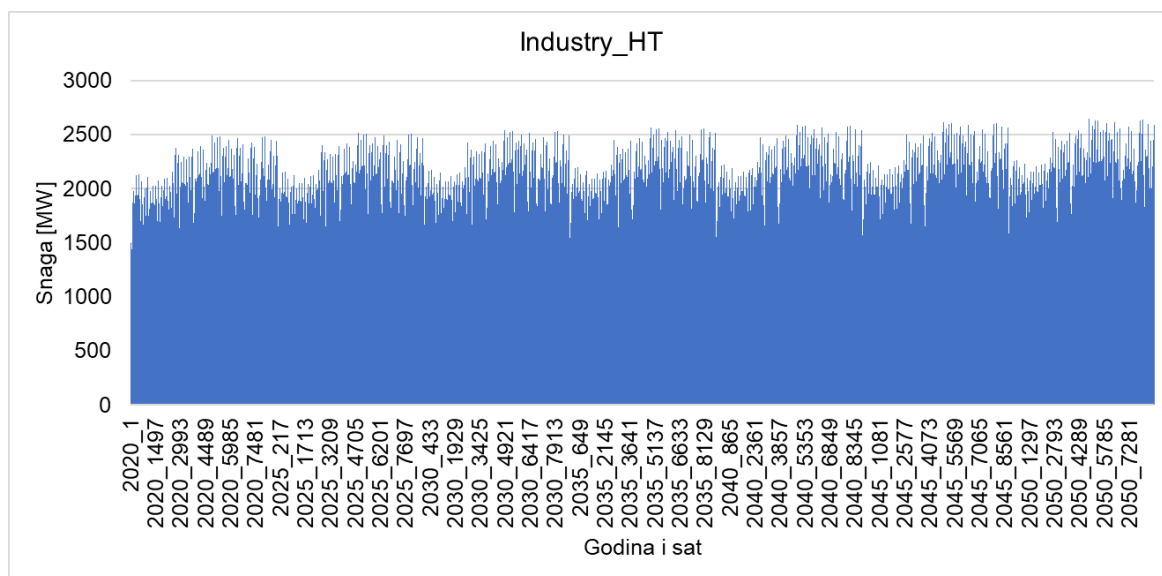
Ostatak toplinskih potreba je modeliran putem individualnih sustava grijanja, a korištenu distribuciju prikazuje Slika 11.



Slika 11. Potražnja za toplinskom energijom u individualnim toplinskim sustavima

4. Sektor industrije

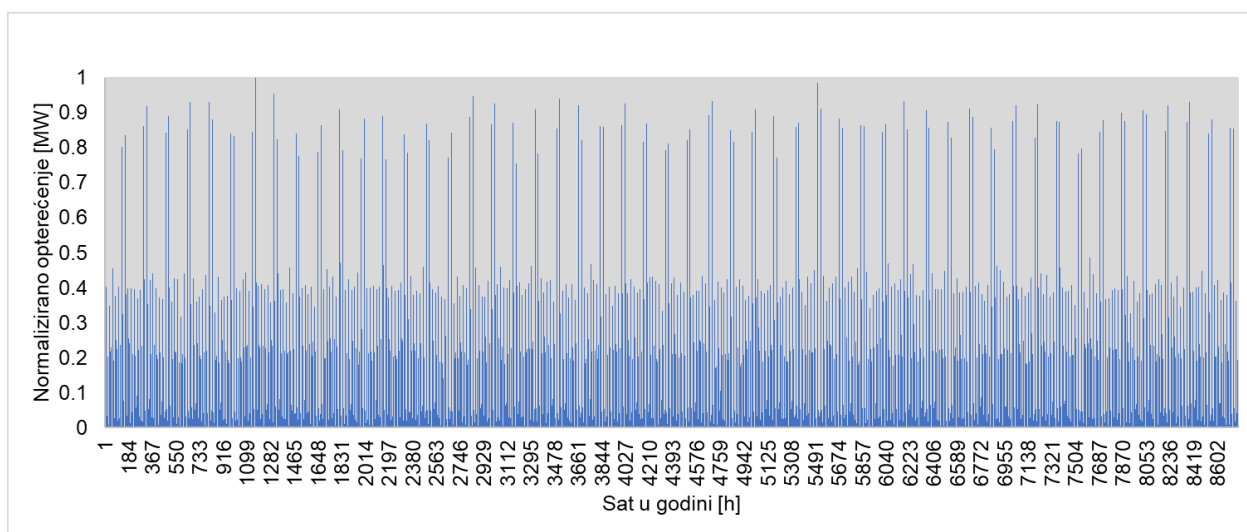
Predviđa se da će potražnja za energijom u industriji porasti za 1 % na godišnjoj razini, što je ukupno povećanje od 34 % do 2050. Ukupna industrijska potražnja za energijom u 2020. iznosi 9 TWh i opskrbljuje se udjelom prirodnog plina od 41 %, nafte od 46 %, ugljenom 6 % i biomase 7 %. Krivulja potražnje je krivulja agregirane potražnje generirana na temelju udjela i tipičnih distribucija različitih grana industrije.



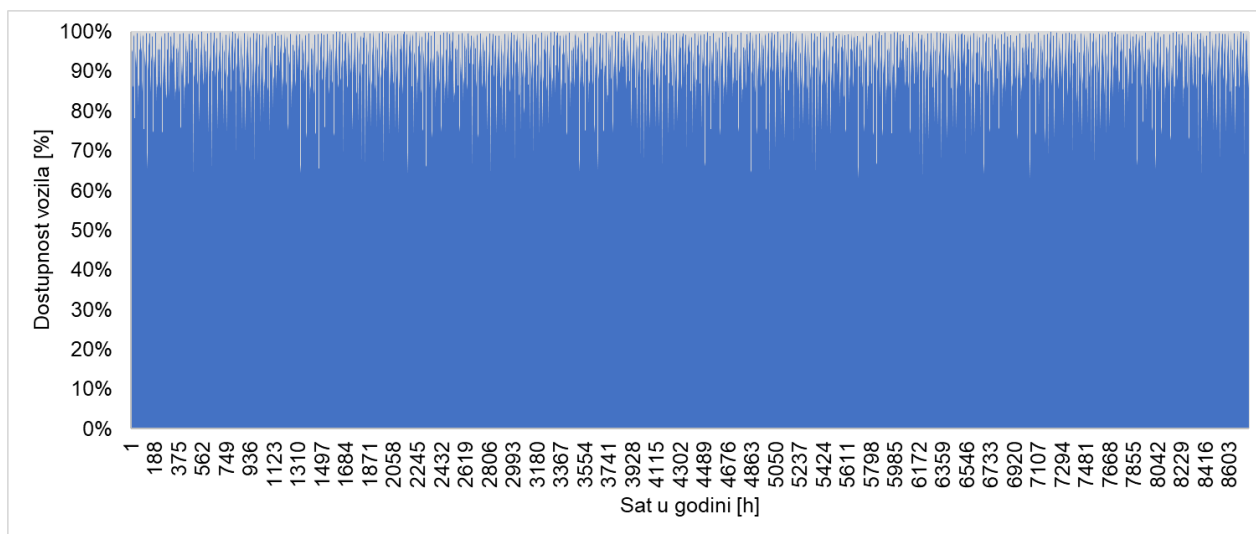
Slika 12. Potražnja energijom u sektoru industrije

5. Sektor transporta

Pretpostavlja se mogućnost dostizanja elektrifikacije transporta do 85 % prema strategiji do 2050. Stoga se pretpostavlja korištenje V2G i tehnologija pametnog punjenja. Pretpostavlja se da će broj vozila ostati isti kroz godine. Hrvatska trenutno ima 2312280 registriranih vozila [9]. Pretpostavlja se prosječni kapacitet punjenja/pražnjenja vozila od 7 kW i prosječni kapacitet baterije od 50 kWh.



Slika 13. Normalizirana potražnja energije u sektoru prometa

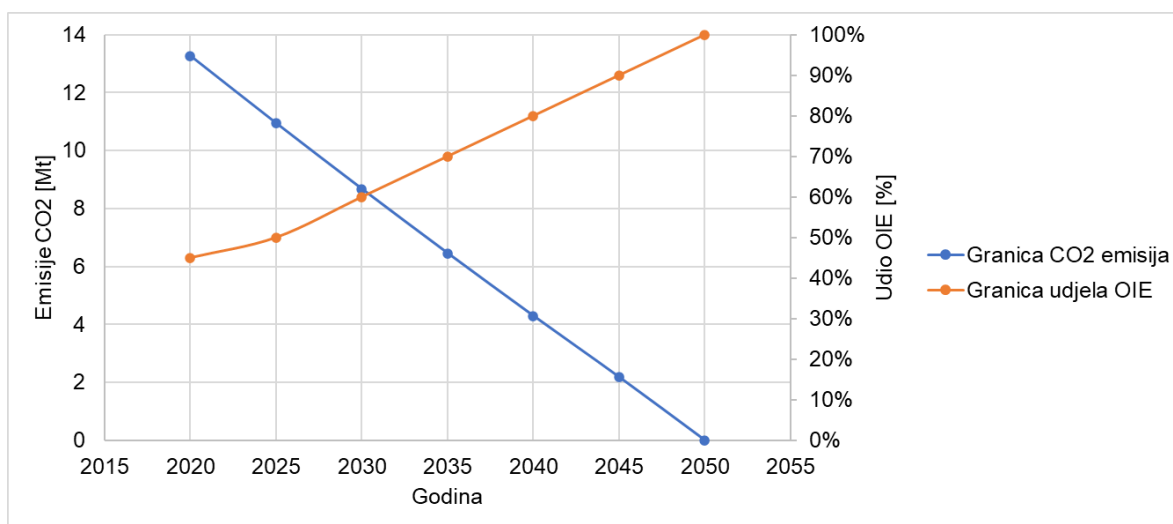


Slika 14. Dostupnost električnog vozila na punjaču

6. Zahtjevi

Uvedena su ograničenja koja moraju biti zadovoljena u rezultatima. Ograničenja prikazuje Slika 15.

1. razina emisija - uvedeno je ograničenje emisija kako bi se osigurao razvoj sustava prema niskougljičnim tehnologijama. Razina ograničenja postepeno pada do 2050. kad doseže 0 Mt.
2. Udio obnovljivih izvora energije u električnoj energiji. - ograničenje se postepeno povećava i doseže 100 % 2050. Ipak, ovo ograničenje se pokazalo čak i nepotrebnim u mnogim slučajevima jer se dolazi znatno ranije do predodređenih razina udjela OIE.
3. CEEP - kritična proizvodnja električne energije (CEEP) je ograničena na maksimalnih 5 % u odnosu na ukupnu potrošnju.



Slika 15. Ograničenja emisija i udjela obnovljivih izvora energije [7]

Ostala ograničenja se u modelu uvode putem ograničenja kapaciteta investicija. Time se postavljaju ograničenja na maksimalne investicije unutar određenog perioda kao i na maksimalne ukupne kapacitete. Također, postavljaju se ograničenja na brzinu uvođenja novih tehnologija kao što je udio vodika u industriji. Ova vrsta ograničenja se postavlja kao odnos udjela tehnologije u prijašnjoj godini u odnosu na sljedeću godinu u kojoj se provodi simulacija.

6. Analiza izgradnje kapaciteta

U ovom se izvještaju daje pregled razvoja energetskog sustava od 2020 do 2050 godine pod utjecajem ciljeva energetske tranzicije Republike Hrvatske u Europske Unije. Analiziraju se investicije u pojedine vrste tehnologija, s naglaskom na power to X tehnologije.

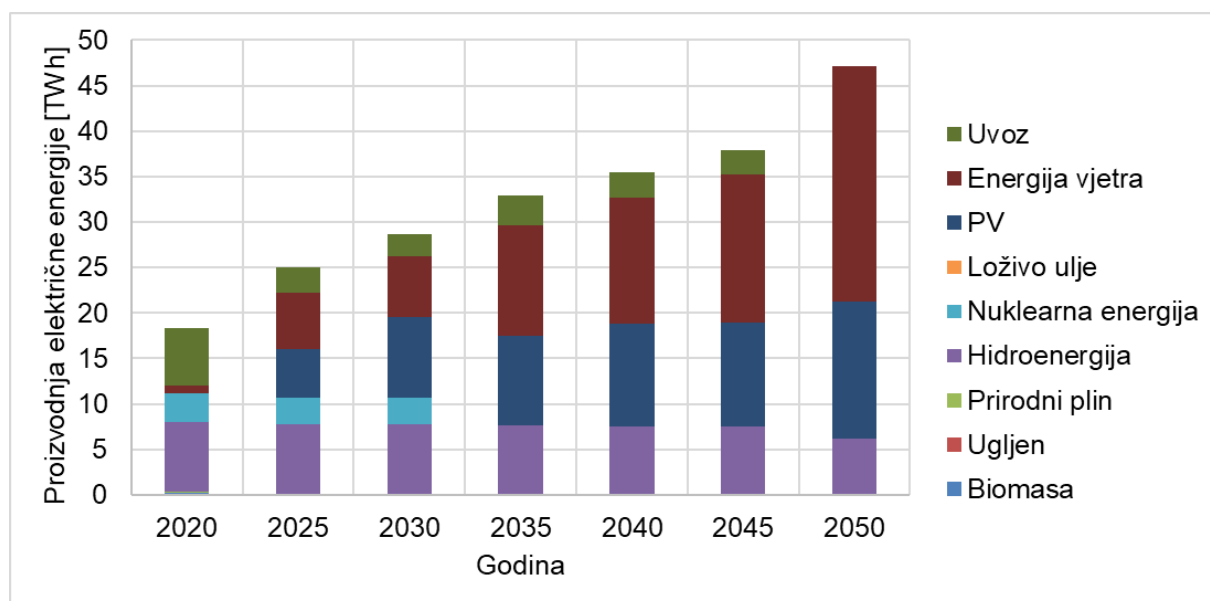
Rezultate investicija u obnovljive izvore energije prikazuje Tablica 7. Ukupni iznos instalacija fotonaponskih kapaciteta i kapaciteta vjetra do 2050 iznosi 9940 MW za solar i 12403.69 MW za vjetar. Time se dolazi do ukupnih instalacija od 22343.68 MW u obnovljive izvore energije s uvjetom 5 % CEEPa. Ukupni iznos investicija u kapacitete je veći od potencijala i ograničenja implementiranih u model. Do većih vrijednosti dolazi zbog dekomisije starijih kapaciteta čime dolazi do potrebe za dodatnim investicijama.

Tablica 7. Investicije u proizvodne kapacitete

Godina	HR_Solar PP	HR_Solar High	HR_Wind PP	HR_Wind PP1	HR_Wind PP2	HR_Wind PP3
2020						
2025		3000		975.4	1561.97	
2030	0.02	1960	0.01	0.21	387.42	0.02
2035	470.62		673.01	1222.15	1154.32	0.1
2040	1334.49		369.33	337.17	238.13	0.02
2045	174.88		257.9	262.36	344.71	271.71
2050	2999.98		172.78	1180.82	155.59	2838.56
Total	4979.99	4960	1473.03	3978.11	3842.14	3110.41

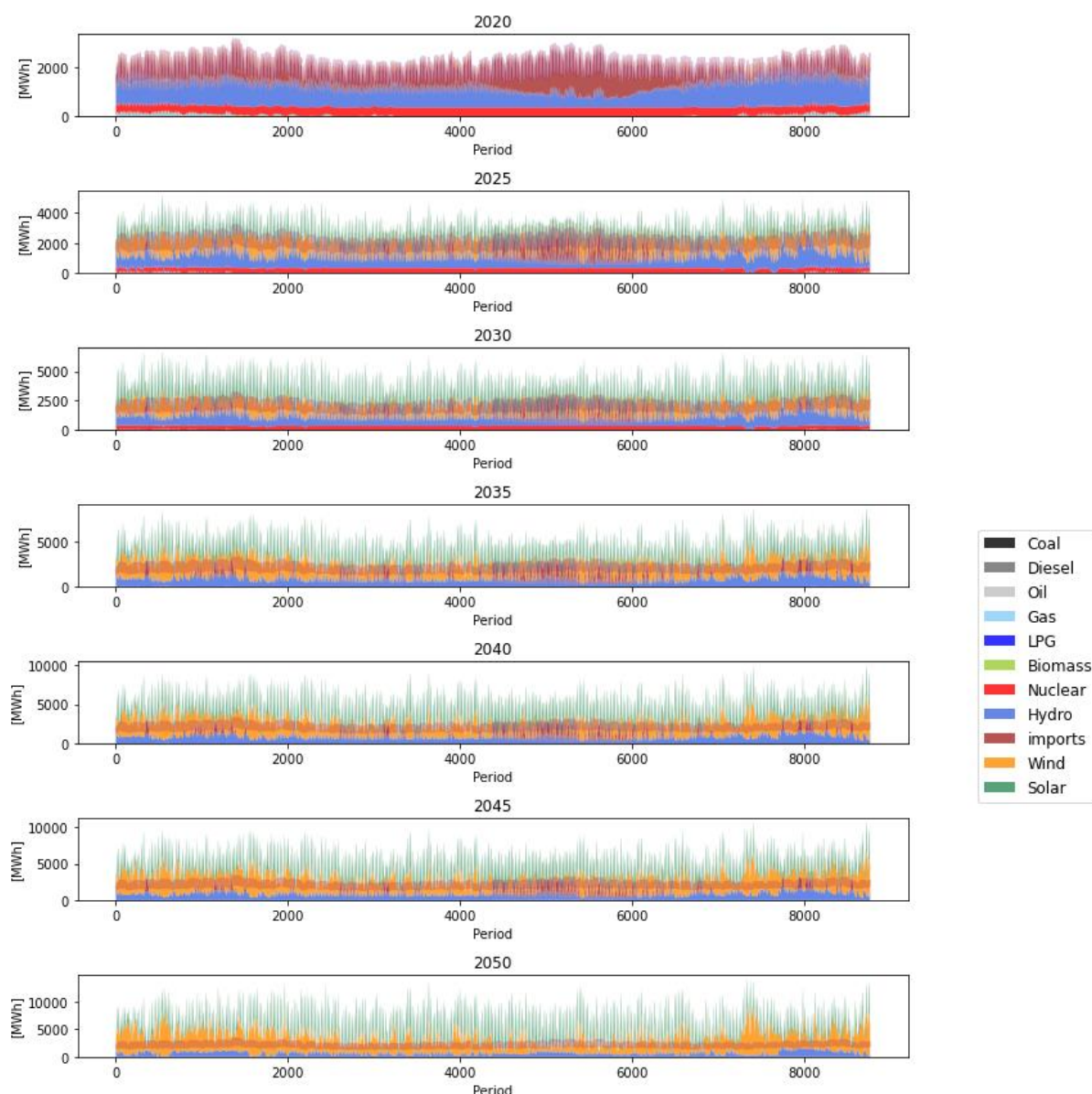
Proizvodnja električne energije se mijenja iz godine u godinu. Slika 16 prikazuje distribuciju proizvodnje prema izvoru energije. Vidljivo je da se proizvodnja iz obnovljivih izvora energije povećava, dok proizvodnja iz hidroenergije i biomase ostaje na približno jednakim razinama. Također se može uočiti smanjenje proizvodnje iz fosilnih goriva kao i iz nuklearne energije.

Nakon 2030. nema više proizvodnje iz nuklearne energije jer se pretpostavlja da dolazi do dekomisije postrojenja.



Slika 16. Proizvodnja električne energije

Rezultate satne distribucije proizvodnje prikazuje Slika 17. vidljivo je da u prvim godinama simulacije model odabire uvoz električne energije umjesto korištenja termoelektrana. Termoelektrane proizvode tek oko 160 GWh električne energije, prvenstveno zbog rada kao kogeneracija.



Slika 17. Satna distribucija proizvodnje električne energije

U modelu se predviđa smanjenje potražnje za grijanjem tijekom godina kao rezultat povećanja energetske učinkovitosti. Potražnja za grijanjem se smanjuje tijekom godina.

Kotlovi na fosilna goriva kao i kotlovi na biomasu su najčešće su korištena tehnologija u individualnim sustavima grijanja na početku simulacije (2020.). Situacija se počinje mijenjati nakon 2035. godine, kada sustav počinje dodavati dizalice topline u individualne sustave grijanja i zamjenjivati kotlove na fosilna goriva. prelazak individualnih sustava grijanja na tehnologije zasnovane na električnim sustavima kao i zamjena kotlova na biomasu koji ne zadovoljavaju emisijske standarde je u skladu s ciljevima postizanja određene razine emisija

CO₂ i udjela obnovljive energije. U 2050. godini sustav dostiže udio rješenja grijanja na električni pogon od 70 % u individualnom sustavu grijanja, dok se ostatak opskrbljuje biomasom.

Instalirani kapacitet svakog izvora topline prikazuje Tablica 8. Ovdje treba napomenuti da zahtjev za udjelom obnovljivih izvora energije uzima u obzir samo udio u potražnji električne energije. Stoga je prijelaz grijanja na obnovljive izvore energije uvjetovan uvođenjem ograničenja emisije ugljika. Iz tog razloga dolazi do velikih investicija tek 2050 kad se velik dio postojećih izvora zamjenjuje dizalicama topline i kotlovima na biomasu. Potrebno je napomenuti da je dio zamijene uvjetovan dekomisijom starijih kapaciteta koji se koriste do kraja životnog vijeka kako bi se smanjili troškovi. Budući da sve razmatrane tehnologije u modelu posjeduju određenu količinu mogućnosti pohrane energije, postoji mogućnost isporuke potrebne toplinske energije i odvajanja samog profila grijanja od profila potražnje za električnom energijom. Kada se međusobno uspoređuju, model preferira investicije u dizalice topline zrak-voda u prvim godinama zbog nižih investicijskih troškova iako nude nižu učinkovitost od geotermalnih dizalica topline. Kasnije, u 2050. godini model pak preferira investicije u geotermalne dizalice topline. Pretpostavlja se smanjenje cijena do tad te time energetski učinkovitije dizalice topline postaju i ekonomski prihvatljivije. Do 2050 se cjelokupni sektor grijanja prebacuje na električne sustave.

Tablica 8. Investicije u kotlove i dizalice topline u individualnim toplinskim sustavima

Godina	Kotlovi na biomasu	Kotlovi na ugljen	Kotlovi na prirodni plin	Kotlovi na loživo ulje	Zrak voda dizalice topline	Električni kotlovi	Geotermalne dizalice topline
2020	6097.24	0	0	0	0	0	0
2025	124.32	0	0	0	0.01	0	0
2030	1565.72	0	0	0	1059.21	0	1.94
2035	0	0	0	0	2944.84	29.99	171.51
2040	0	0	0	0	0	0	0
2045	0	0	0	0	0	0	0.01

2050	0	0	0	0	0	0	6703.23
Total	7787.28	0	0	0	4004.06	29.99	6876.69

Približno 10 % potreba za grijanjem pripada centraliziranim toplinskim sustavima. U rezultatima je vidljivo da se energetske potrebe u ovom sektoru podmiruju kombinacijom kogeneracijskih postrojenja, kotlova i dizalica topline. Potrebno je napomenuti da sva kogeneracijska postrojenja izlaze iz pogona do 2050 zbog isteka životnog vijeka opreme

Najveći dodaci kapaciteta u centraliziranim toplinskim sustavima se ostvaruju 2020. Provodi se ulaganje uglavnom u kotlove na biomasu kako bi se zamijenio dio prirodnog plina u kogeneracijskim postrojenjima. U suprotnosti, tokom godina 2025-2050, prevladavaju investicije u električne sustave. Potrebno je primjetiti da se tokom prvog perioda preferira investiranje u dizalice topline zrak – voda, dok se nakon 2035 preferira investicija u električne kotlove. Razlog tome je velika dostupnost viškova energije iz varijabilnih obnovljivih izvora energije u kasnijim godinama. Time se do 2050. godine udio grijanja na električni pogon u povećava na približno 70 %, dok se ostatak opskrbljuje biomasom. Rezultate prikazuje Tablica 9.

Tablica 9. Investicije u kotlove i dizalice topline u centraliziranim toplinskim sustavima

Godina	Kotlovi na biomasu	Kotlovi na ugljen	Kotlovi na prirodni plin	Kotlovi na loživo ulje	Zrak voda dizalice topline	Električni kotlovi	Geotermalne dizalice topline
2020	212.71	0	0	0	0	0	0
2025	0	0	0	0	121.44	0.52	0.29
2030	0	0	0	0	69.65	0.08	0.06
2035	0	0	0	0	47.69	0.62	0.08
2040	0	0	0	0	10.11	19.91	0.01
2045	0	0	0	0	0.02	55.81	0.01
2050	0	0	0	0	0.02	232.31	0

Total	212.71	0	0	0	248.93	309.25	0.45
-------	--------	---	---	---	--------	--------	------

Kapacitete investicija u različite sustave pohrane energije i vodikove tehnologije prikazuje Tablica 10. Vidljiva je potreba za instalacijom alkalnih elektrolizatora i pohrane vodika. Razlog nedostatka investicija u stacionarne sustave pohrane dolazi zbog korištenja drugih tehnologija kao što su baterije električnih vozila u vehicle to grid režimu rada, pohrane i korištenja vodika u industriji kao i toplinskih sustava baziranih na električnoj energiji. Također je bitno primijetiti da se 2050 dodaju kapaciteti gorivih članaka čime se omogućuje povratak energije spremljene u vodik natrag u mrežu.

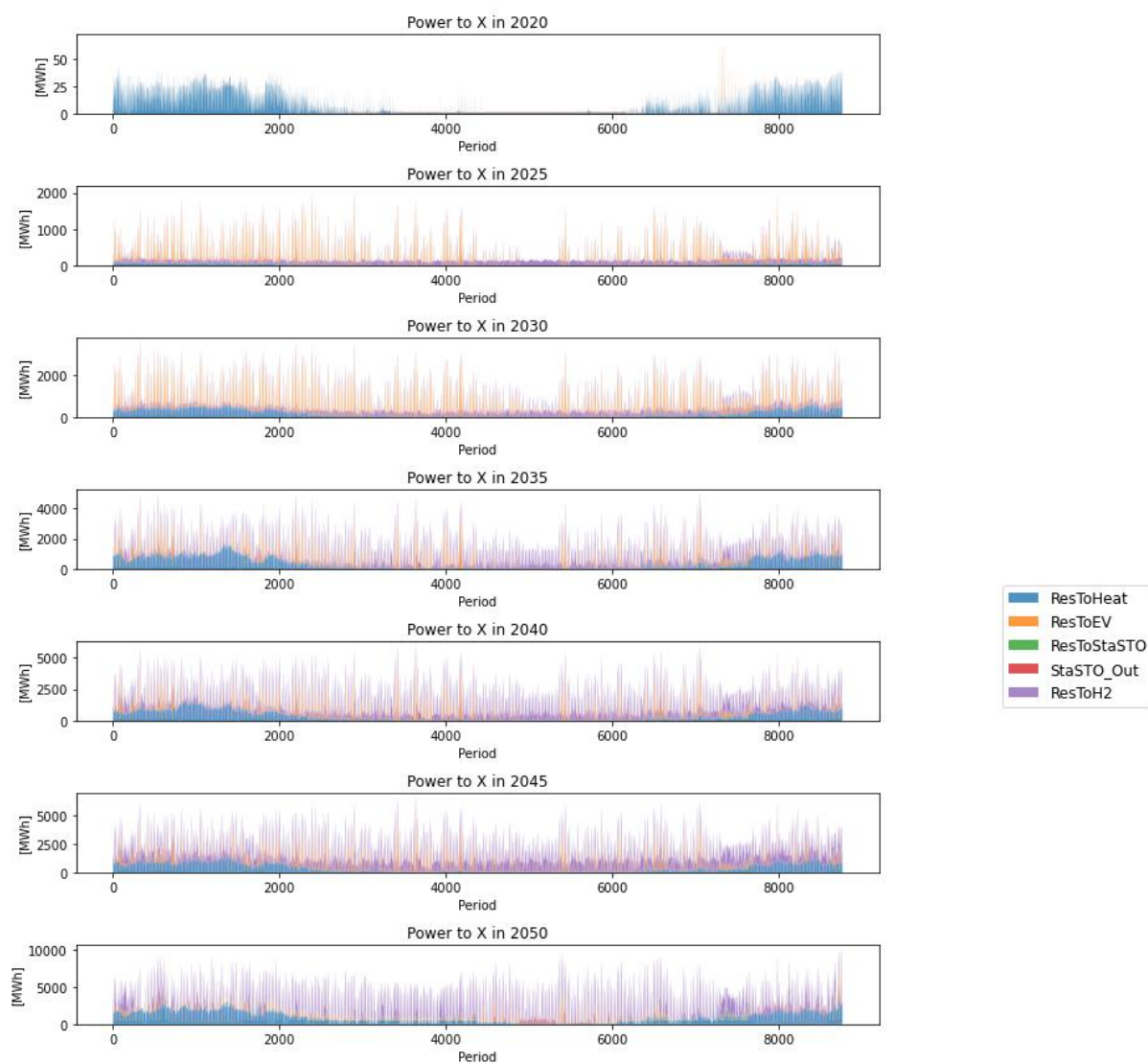
Tablica 10. Investicija u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije

Godina	Alkalni elektrolizator (MW)	PEM elektrolizator (MW)	SOEC elektrolizator (MW)	PEM gorivi članak (MW)	SO gorivi članak (MW)	H ₂ Pohrana (MWh)	Litij ionske baterije (MWh)
2020	0.01	0	0	0.02	0	0.01	0
2025	100.98	0	0.01	0.01	0.01	11.96	0
2030	135.59	0	0	0.02	0.01	403.56	0
2035	615.33	0	0	0.01	0.01	3176.02	0.09
2040	446.73	0	0.01	0.01	0.01	986.96	0.08
2045	0	0	0.09	0	0.01	0.05	0.25
2050	0	0	3254.33	0	0	95421.44	99999.48
Total	1298.64	0	3254.44	0.07	0.05	100000	99999.9

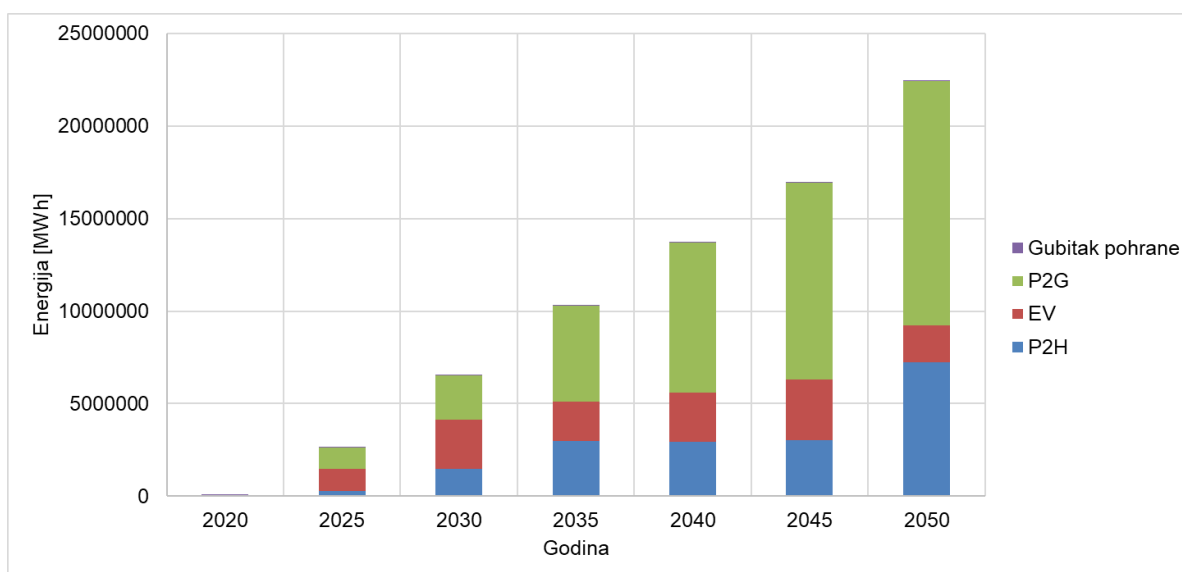
Rad Power to X opcija prikazuje Slika 18. I u ovom slučaju je vidljiva evolucija sustava te postepeno dodavanje novih vrsta tehnologija. 2020. godine se većina „power-to-X“ tehnologija odnosi na power to heat tehnologiju, ali se već od 2025 situacija mijenja uvođenjem električnih vozila. Tad počinje prevladavati potražnja električne energije za pametno punjenje i električnih vozila kao i njihov rad u V2G režimu. Naposljetku se uvodi i proizvodnja vodika, primarno za industrijske potrebe te preuzima najveći dio potrošnje energije P2X opcija. Sam odnos između zastupljenosti pojedinih Power-to-X tehnologija prikazuje Slika 19.

Također dolazi do neuobičajenih situacija kao što se može vidjeti za energiju koja se koristi za pametno punjenje električnih vozila. Primjerice, 2050 dolazi do manje potrebe za energijom u pametnom punjenju električnih vozila u usporedbi s 2045. Razlog tome leži u usporedbi

korištenja V2G tehnologije i proizvodnje vodika. Proizvodnja vodika također pruža fleksibilnost, ali je njena implementacija nužna od strane osiguranja dekarbonizacije industrije. Time se jednim potezom osigurava dekarbonizacija i osiguravanje fleksibilnosti te se može smanjiti korištenje skupljih tehnologija kao što je V2G.

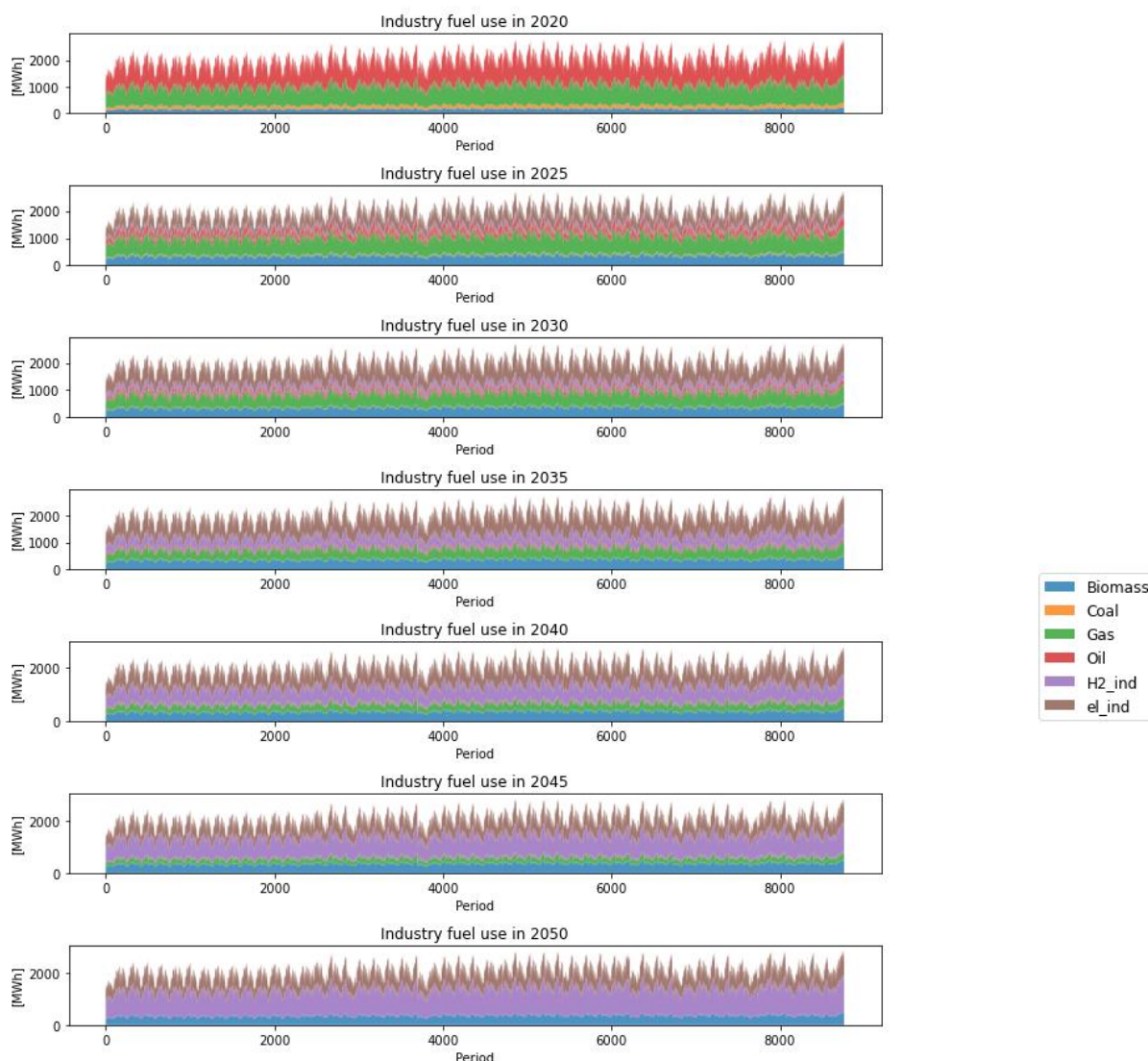


Slika 18. Rad Power to X tehnologija



Slika 19. Potrošnja električne energije pojedinih Power-to-X tehnologija

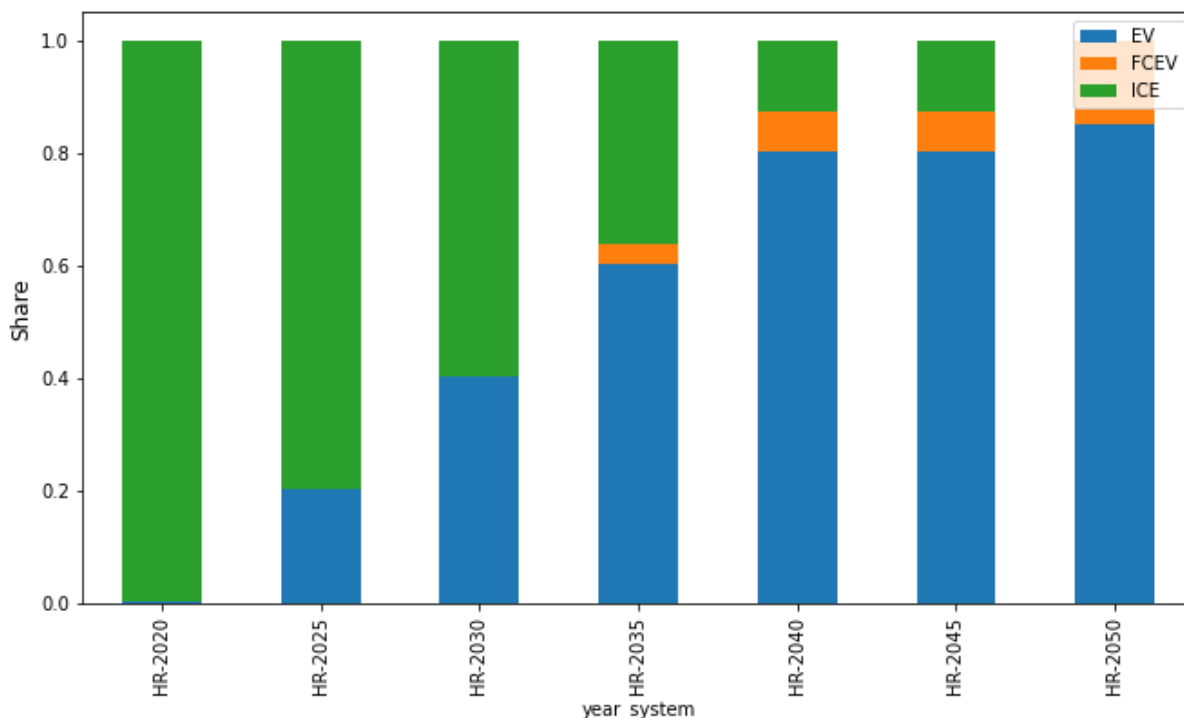
Transformaciju sektora industrije prikazuje Slika 20. sustav evoluira od sustava zasnovanog primarno na prirodnom plinu i nafti prema potpuno dekarboniziranom sustavu do 2050. postepeno dolazi do zamjene fosilnih goriva sa električnom energijom i vodikom. Potrebno je napomenuti da su udjeli izvora energije u svakom satu jednaki tokom godine kako bi se spriječilo prevladavanje nekog od izvora energije u pojedinim satima uslijed velike dostupnosti resursa. To se primjerice odnosi na električnu energiju koja je dostupna u slučaju prekomjerne proizvodnje.



Slika 20. Energija u industriji

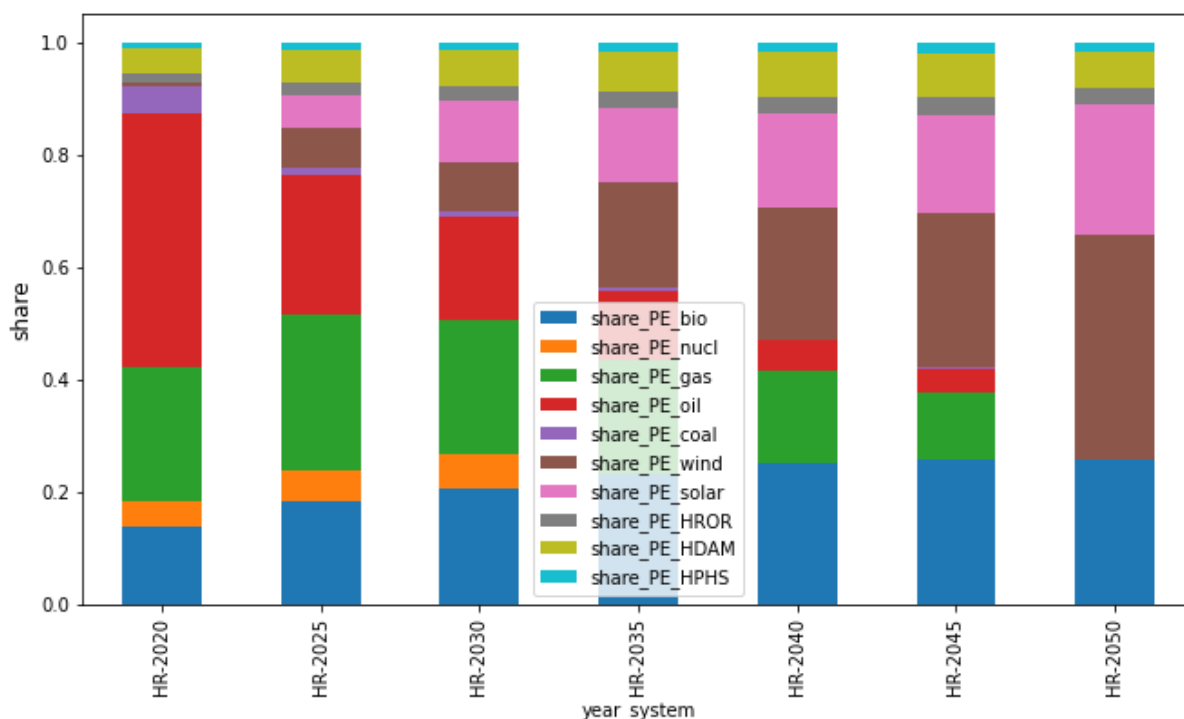
Model slijedi ograničenje udjela električnih vozila u sektoru transporta na 85 % do 2050 prema Strategiji energetskega razvoja Republike Hrvatske za 2030. s pogledom na 2050 [3]. Uslijed sve povoljnijih cijena i potreba za dekarbonizacijom dolazi do prelaska transporta na električna vozila kao što prikazuje Slika 21. Ipak, dio sektora ostaje koristiti vozila s motorima s unutrašnjim izgaranjem. Ostatak dekarboniziranog djela transporta se odnosi na vozila na vodik, ali ona zahtijevaju značajno više investicije što smanjuje njihovu mogućnost primjene. Iz tog razloga se ostatak iznad 85 % koliko maksimalno mogu zauzimati električna vozila pokriva putem vozila na vodik. Adaptacija novih vrsta vozila kao nove tehnologije je također ograničena simulacijom dostupnosti proizvodnih kapaciteta za opskrbom tržišta novom tehnologijom. Naime, kako bi se omogućila masovnija proizvodnja, potrebno je izgraditi nove

proizvodne linije ili prenamijeniti postojeće. Također, potrebno je osigurati opskrbe lance kritičnih minerala i sirovina koji predstavljaju ograničenja u proizvodnji. Navedene transformacije zahtijevaju vrijeme potrebno za implementaciju.



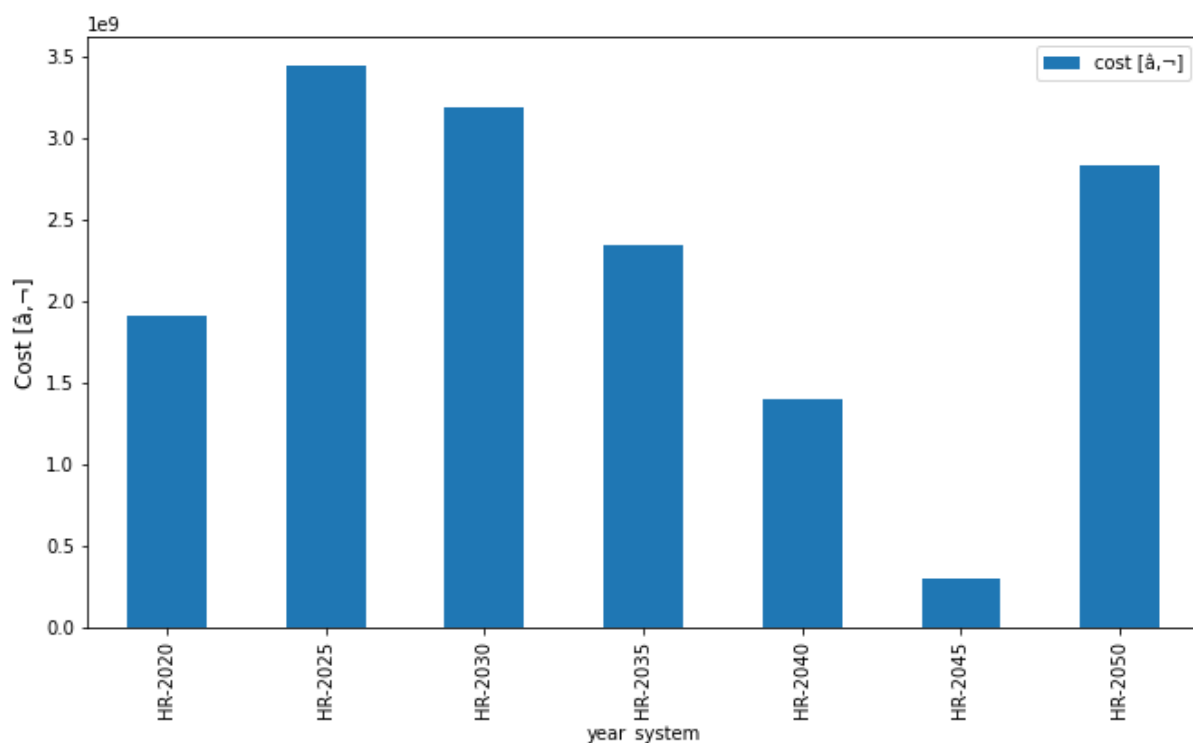
Slika 21. Sektor transporta

Udjele bilanca primarne energije prikazuje Slika 22. Vidljivo je smanjenje korištenja fosilnih goriva, prvenstveno nafte i ugljena, dok se udio prirodnog plina u primarnoj energiji smanjuje tek od 2030. godine. U isto vrijeme dolazi do povećanja udjela varijabilnih obnovljivih izvora energije u primarnoj energiji. Također valja primijetiti velik udio fosilnih goriva u prvim godinama kao posljedica niske učinkovitosti procesa koji se koriste te koliko mali udio zauzima hidroenergija. Korištenje biomase je ograničeno na maksimalnih 30 % u primarnoj energiji, ali nikad ne doseže tu granicu.



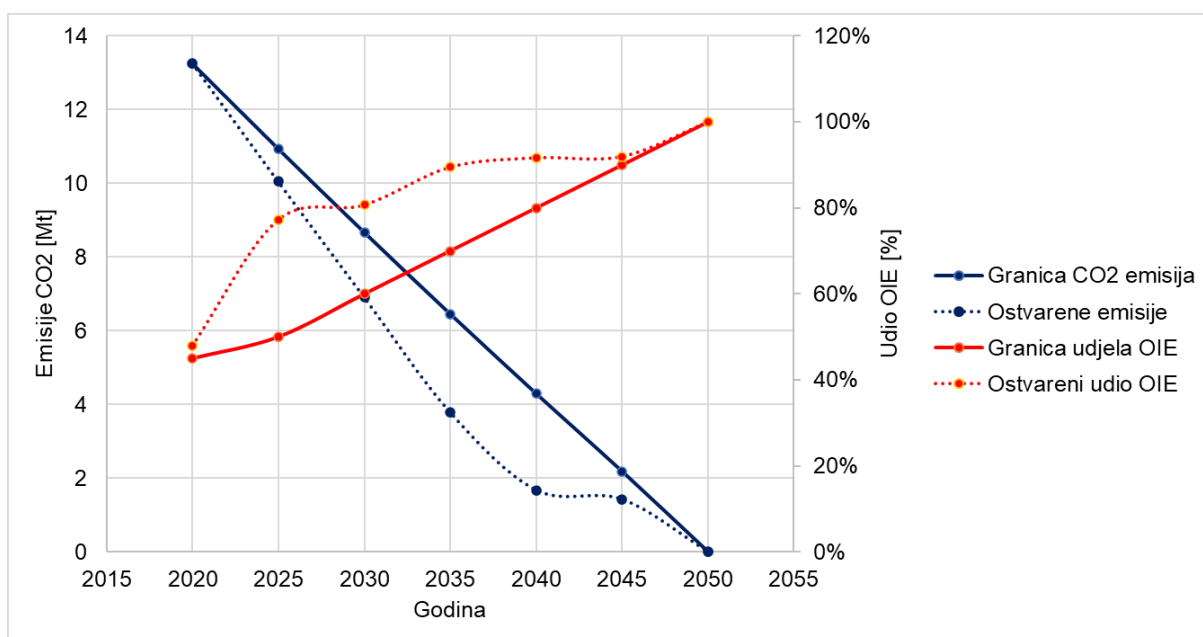
Slika 22. Udjeli primarne energije

Slika 23. prikazuje trošak sustava po godinama. Vidljivo je kako u prvim godinama sustav ima visoke troškove kao kombinacija korištenja goriva i investicija u nove kapacitete. Uloga investicija je prvenstveno vidljiva za godinu 2025 što je posljedica velikih investicija u toj godini. Također, vidljiva je značajna investicija u nove kapacitete 2050. kako bi se postigla kompletna dekarbonizacija. Tokom godina između 2030. i 2050 je vidljivo značajno smanjenje troškova kao rezultat uvođenja obnovljivih izvora energije. U tim godinama dolazi do smanjenja potrošnje fosilnih goriva te sustavom prevladavaju obnovljivi izvori energije.



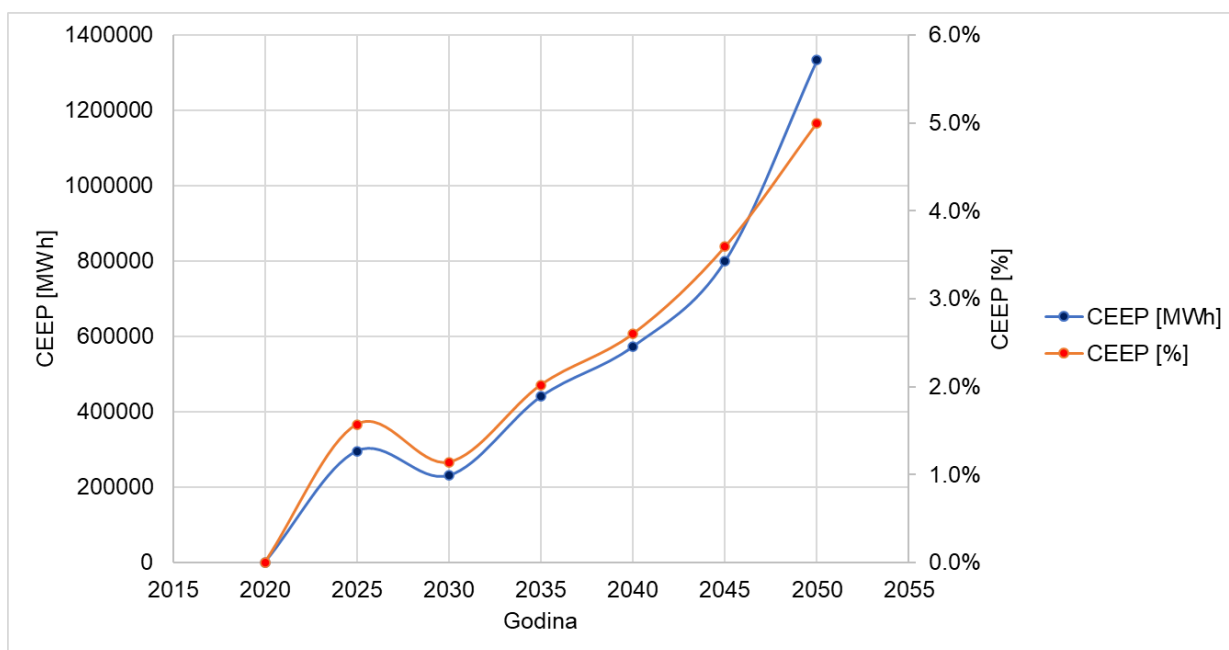
Slika 23. Troškovi sustava po godinama

Odnos između uvedenih ciljeva u pogledu emisija CO₂ i udjela obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije prikazuje Slika 24. Vidljivo je da u gotovo svim godinama sustav provodi veće smanjenje emisija te postiže veći udio obnovljivih izvora od minimalno zahtijevanih iznosa. Jedina iznimka je prva godina po pitanju emisija te posljednja godina po pitanju udjela OIE. Nadmašuju se granice zbog ekonomski povoljnijih opcija u slučaju korištenja većeg udjela obnovljive energije.



Slika 24. Usporedba ostvarenih emisija i udjela OIE u odnosu na ciljeve

Model također poštuje i ograničenje prekomjerne proizvodnje električne energije. Slika 25. prikazuje iznos prekomjerne proizvodnje iskazan u MWh kao i postotak u odnosu na ukupnu potrošnju električne energije. Vidljivo je da model uspijeva zadržati CEEP ispod 5 % tokom svih godina.



Slika 25. CEEP

7. Reference

- [1] H2RES, dostupno na: <https://h2res.org/>, pristupljeno 15.6.2022.
- [2] Europska Komisija, Ciljevi ugljične neutralnosti Europske Unije, dostupno na: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_hr, pristupljeno 15.6.2022.
- [3] Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_25_602.html, pristupljeno 15.6.2022.
- [4] Lund, H. Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions
- [5] Dispa-SET model, dostupno na: <http://www.dispaset.eu/en/latest/>, pristupljeno 15.6.2022.
- [6] International Renewable Energy, dostupno na: <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>, pristupljeno 15.6.2022.
- [7] Međunarodna energetska agencija, dostupno na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD>, pristupljeno 15.6.2022.
- [8] Entso-e, dostupno na: <https://www.entsoe.eu/>, pristupljeno 15.6.2022.
- [9] Podaci o registriranim vozilima u Hrvatskoj, dostupno na: <https://www.ceicdata.com/en/croatia/number-of-vehicle-registrations/no-of-registered-vehicles-ow-passenger-cars>, pristupljeno 15.6.2022.