

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

*D2.2 – Analiza veza između 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.....	2
5. Energetski sustav Republike Hrvatske.....	3
1. Postojeći kapaciteti.....	3
2. Električna energija.....	7
3. Sektor grijanja.....	11
4. Sektor industrije.....	14
5. Sektor transporta.....	15
6. Zahtjevi.....	16
6. Analiza izgradnje kapaciteta.....	17
7. Reference.....	30

## 1. POPIS SLIKA

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

## 2. POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci o akumulacijskim hidroelektranama [3] .....	3
Tablica 2. Podaci o reverzibilnim hidroelektranama .....	4
Tablica 3. Podaci o protočnim hidroelektranama.....	4
Tablica 4. Podaci o termoelektranama na biomasu, ugljen i nuklearnu energiju [3].....	5
Tablica 5. Podaci o termoelektranama na loživo ulje i prirodni plin [3] .....	6
Tablica 6. Kapaciteti varijabilnih obnovljivih izvora energije [5] .....	7
Tablica 7. Investicije u proizvodne kapacitete .....	17
Tablica 8. Investicije u kotlove i dizalice topline u individualnim toplinskim sustavima .....	20
Tablica 9. Investicije u kotlove i dizalice topline u centraliziranim toplinskim sustavima .....	21
Tablica 10. Investicija u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije.....	22

### 3. Sažetak

Ovaj izvještaj razmatra uvođenje Power to X tehnologija i tehnologija odgovora potrošnje. Provode se simulacije i optimizacije energetskog sustava unutar određenih granica uz primjenu programa H2RES [1]. Razmatra se njihova primjena na istim ciljevima kao što su uspostavljeni u Strategiji energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu [2]. Uvode se jednaka ograničenja u postignutim ciljevima smanjenja emisija CO<sub>2</sub> i povećanja udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije. Također, uvode se jednaka ograničenja na instalaciju kapaciteta obnovljivih izvora i adaptaciju električnih vozila.

Razmatra se uvođenje tehnologija pametnog punjenja električnih vozila, povratka energije u mrežu (V2G), pretvorbe električne u toplinsku energiju (P2H) pretvorbe električne energije u kemijsku energiju vodika (P2G). Također se razmatra korištenje pohrana energije u stacionarnim baterijskim sustavima i u obliku vodika.

Pametno punjenje električnih vozila je modelirano uz zadavanje potreba za energijom u sektoru transporta, ukupnog broja vozila, dostupnosti vozila za punjenje te uz zadavanje osnovnih karakteristika opreme potrebne za punjenje. Također se zadaju uvjeti zadovoljenja propotovane udaljenosti u godini. Sustav provodi nabavu novih i dekomisije starih vozila te može birati između vozila s motorima na unutrašnje izgaranje, električnih vozila te vozila na vodik. Uslijed dostupnosti vozila za punjenje i potrebe za zadovoljavanjem isporuke energije, model optimizira postupak punjenja vozila. Također, vozila su dostupna za pražnjenje energije skladištene u baterijama prema mreži uz korištenje V2G tehnologije. Slično se i kod sustava pretvorbe električne u toplinsku energiju omogućava fleksibilnost uslijed postojanja pohrane energije. Time se omogućava iskorištavanje dostupnih viškova električne energije uslijed prekomjerne proizvodnje iz varijabilnih obnovljivih izvora energije. Model također razmatra uvođenje korištenja vodika, posebice u sektoru industrije. Vodik se koristi kako bi se dekarbonizirao sektor industrije te kako bi se pružila fleksibilnost energetskom sustavu. Proizvodnja vodika je fleksibilizirana uspostavom pohrane vodika te zbog toga može služiti potrebama balansiranja sustava.

## **4. Summary**

This report considers the introduction of Power to X technologies and demand-response technologies. Simulations and optimizations of the energy system within certain limits are performed using the H2RES program [1]. Their application on the same goals as established in the Development Strategy of the Republic of Croatia until 2030 with an outlook to 2050 is considered [2]. Equal limitations are introduced in the achieved goals of reducing CO<sub>2</sub> emissions and increasing the share of renewable energy sources in electricity production. Also, equal restrictions are introduced on the installation of renewable energy capacities and the adaptation of electric vehicles.

The introduction of technologies for smart charging of electric vehicles, return of energy to the grid (V2G), conversion of electricity into heat energy (P2H) conversion of electricity into chemical energy of hydrogen (P2G) is considered. The use of stationary battery energy storage systems and storage in hydrogen storage systems is also considered.

Smart charging of electric vehicles is modelled by setting the energy needs in the transport sector, the total number of vehicles, the availability of charging vehicles and by setting the basic characteristics of the equipment needed for charging. The conditions for satisfying the distance travelled during the year are also set. The system procures new and decommissions old vehicles. It can choose between vehicles with internal combustion engines, electric vehicles and hydrogen fuel cell vehicles. The model optimizes the vehicle charging process on the basis of charging availability and energy demand. Also, vehicles are available to discharge the energy stored in the batteries towards the grid using V2G technology. Similarly, power to heat system allows for the introduction of flexibility. This allows the use of available surplus of electricity available in times of overproduction from variable renewable energy sources. The model also considers the introduction of hydrogen demand, especially in the industrial sector. Hydrogen is used to decarbonise the industrial sector and to provide flexibility to the energy system. Hydrogen production is flexible due to hydrogen storage and can therefore provide the services of balancing the system.

## 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 stavljene podaci o trošku investicije kao beskonačni.

Tablica 1. Podaci o akumulacijskim hidroelektranama [3]

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	RHEVebebit	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 [3]

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 termoelektromama na loživo ulje i prirodni plin. Vidljivo je da dio termoelektromana 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 termoelektromama na loživo ulje i prirodni plin [3]

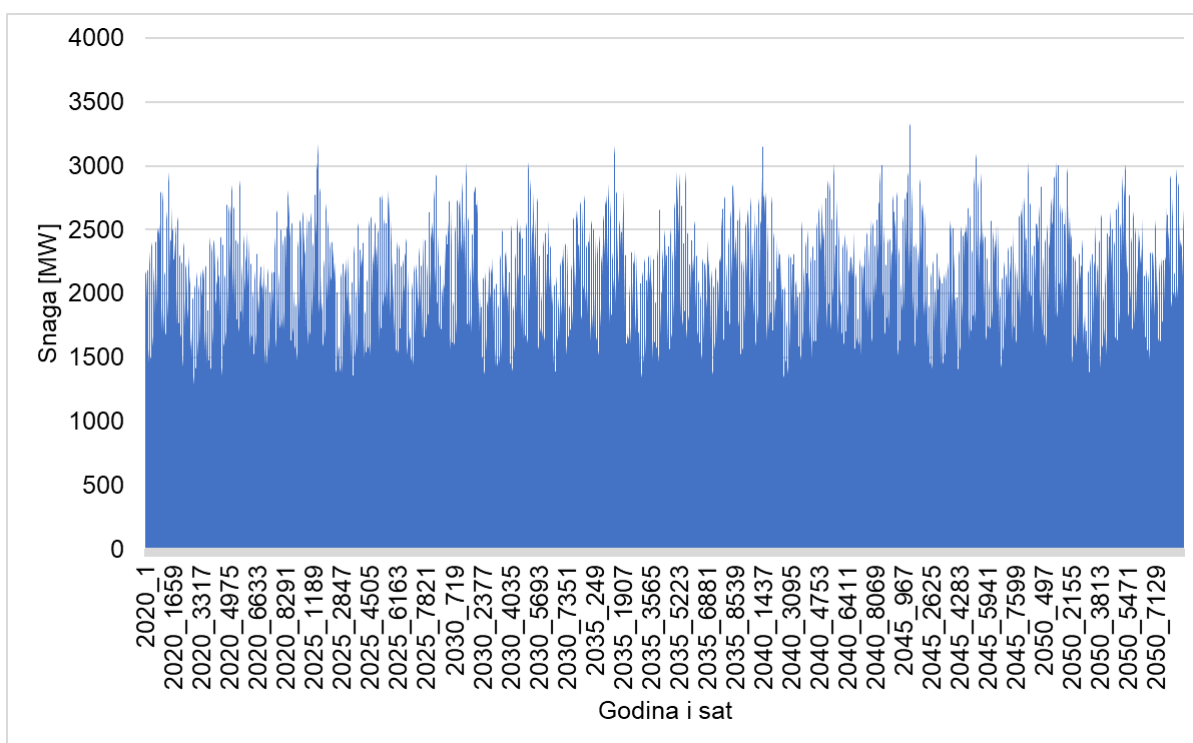
Ime	TERijeka	TESisak	TE-TOOsijek	TE-TOZagreb	EL-TOZagreb	KTEJertovec
Kapacitet [MW]	303	396	90	440	90	78
Gorivo	Oil	Oil	Gas	Gas	Gas	Gas
Početak dekomisije	50	15	15	15	15	15
Vijek trajanja	50	25	25	25	25	25
Početak dekomisije novosagrađenih	40	20	20	20	20	20
Preostali kapacitet nakon dekomisije	0.1	0.1	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 [5]

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

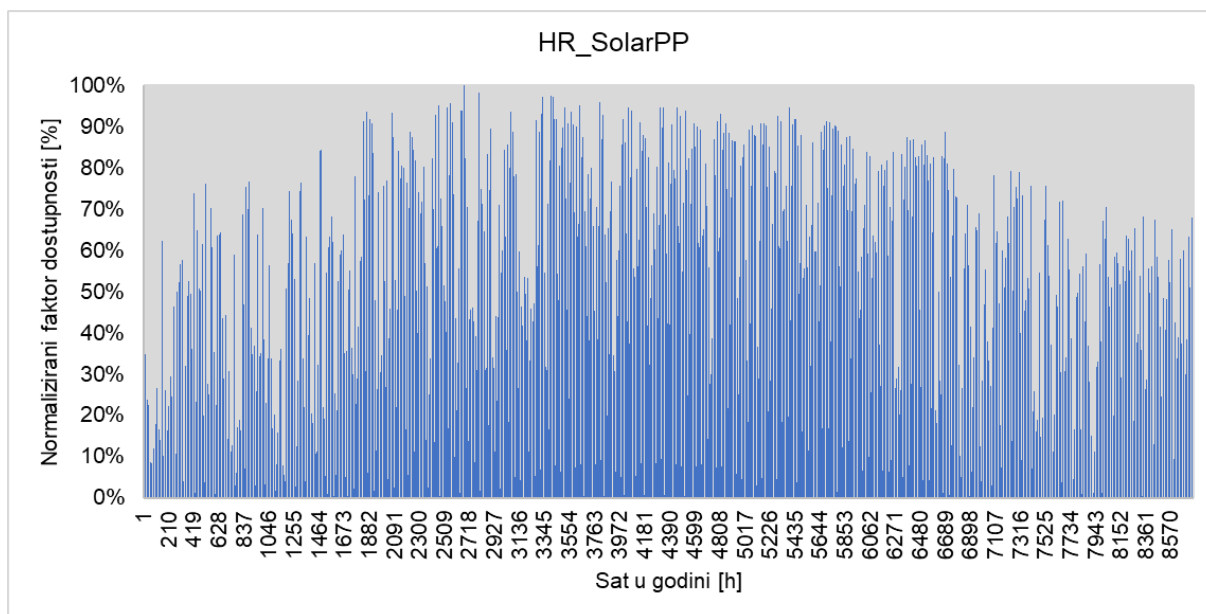
## 2. Električna energija

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 [6][7]. 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.



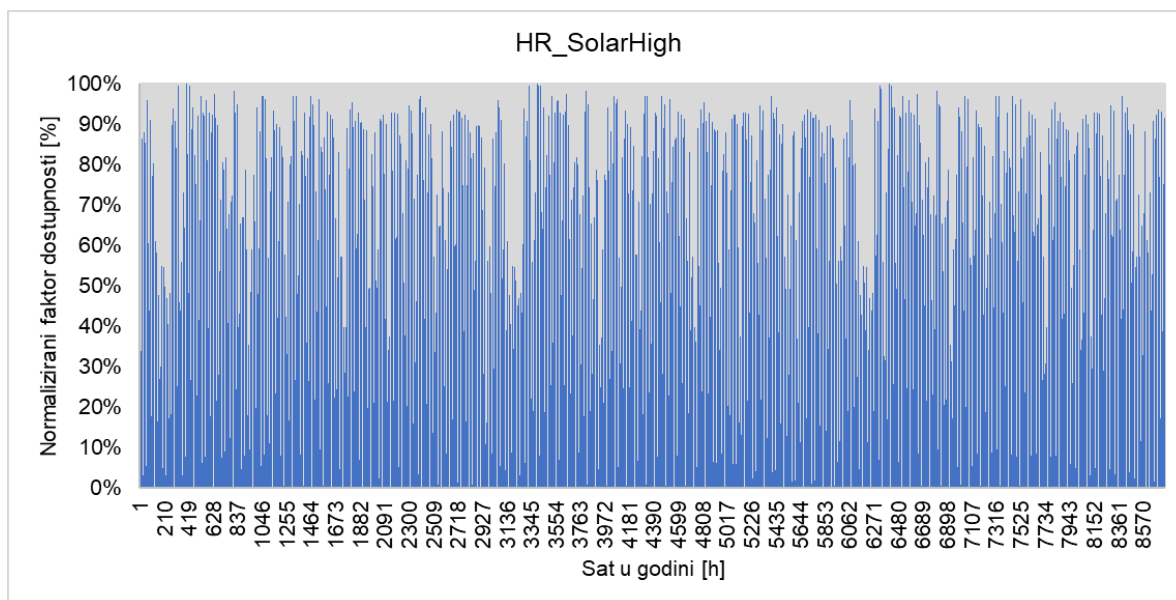
Slika 1. Osnovna potražnja za električnom energijom

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 %.



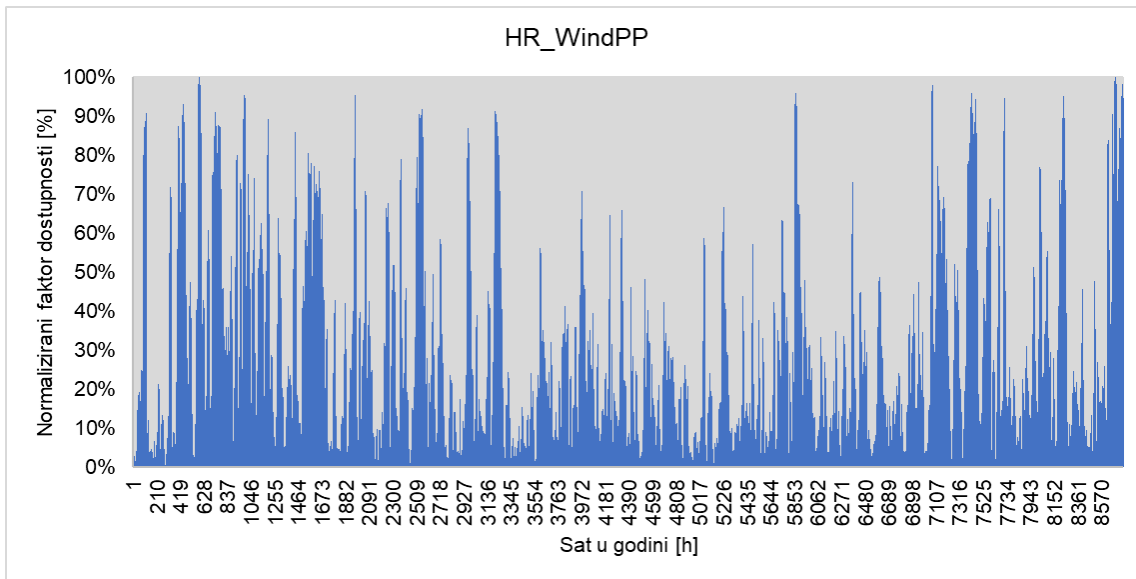
Slika 2. Normalizirana proizvodnja iz solarne elektrane HR\_SolarPP

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 %.



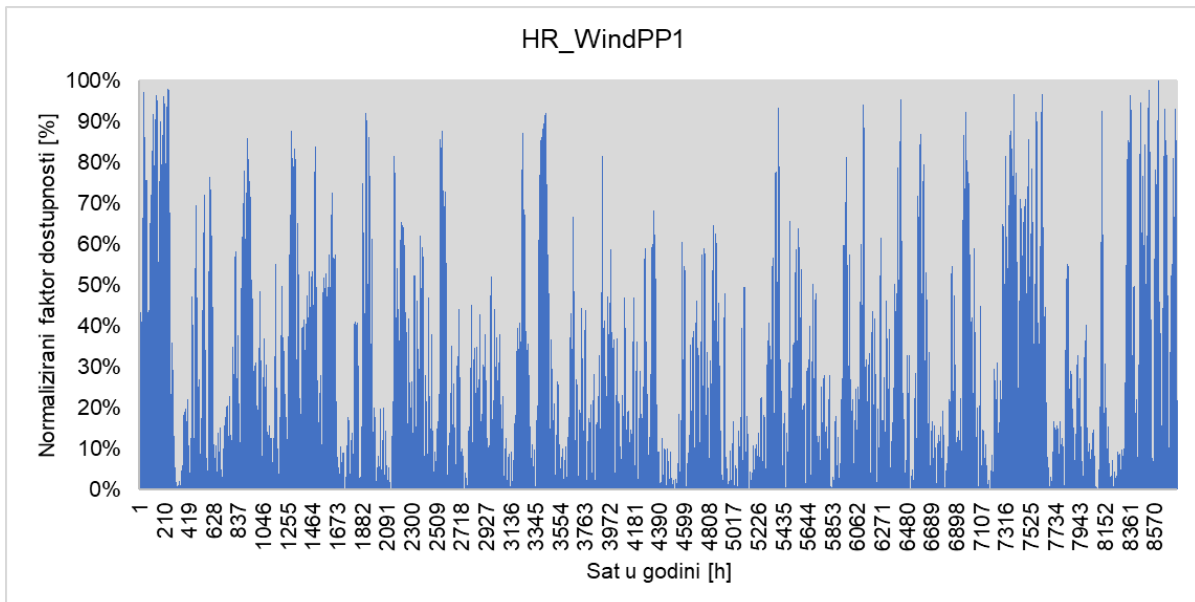
Slika 3. Normalizirana proizvodnja iz solarne elektrane HR\_SolarHigh

Energija vjetrova 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.



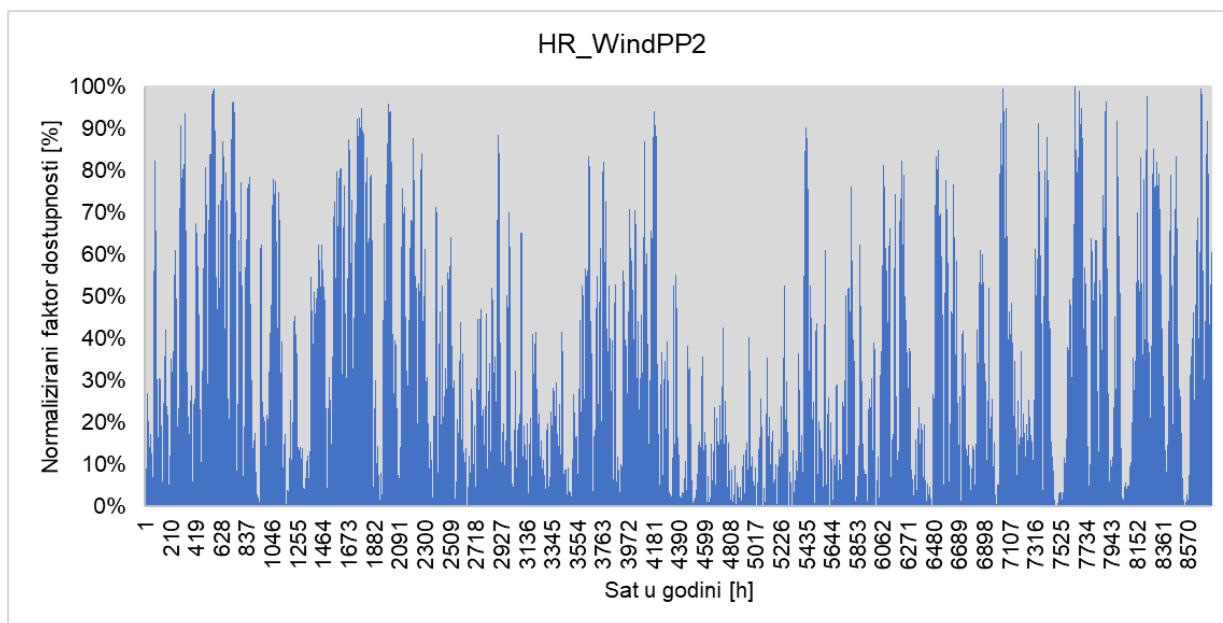
Slika 4. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR\_WindPP

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.



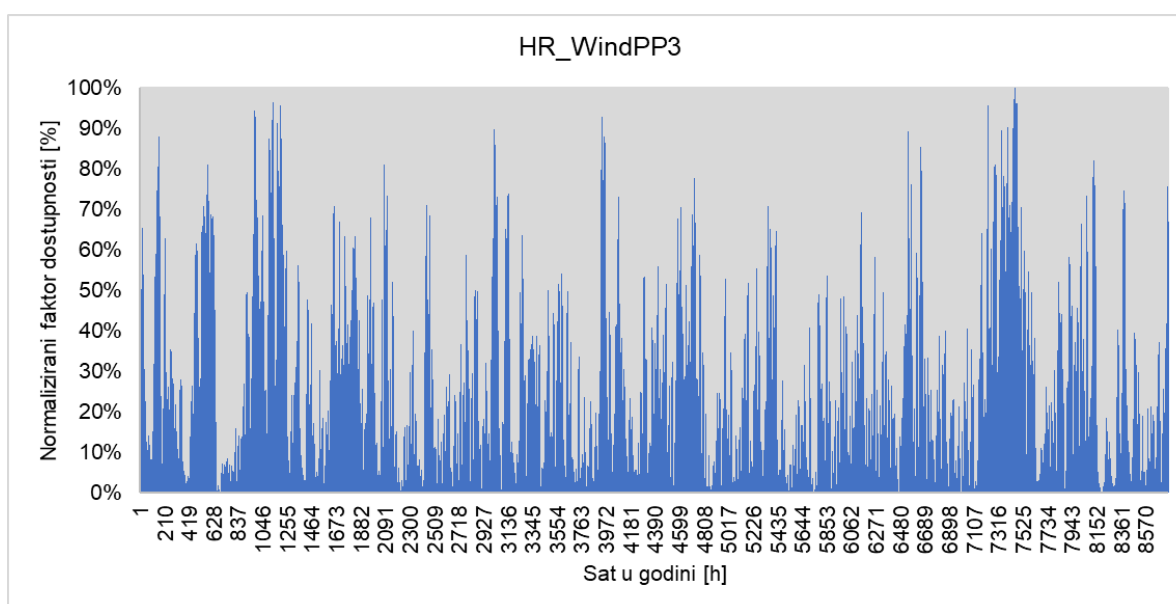
Slika 5. Normalizirana proizvodnja iz vjetroelektrane HR\_WindPP1

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

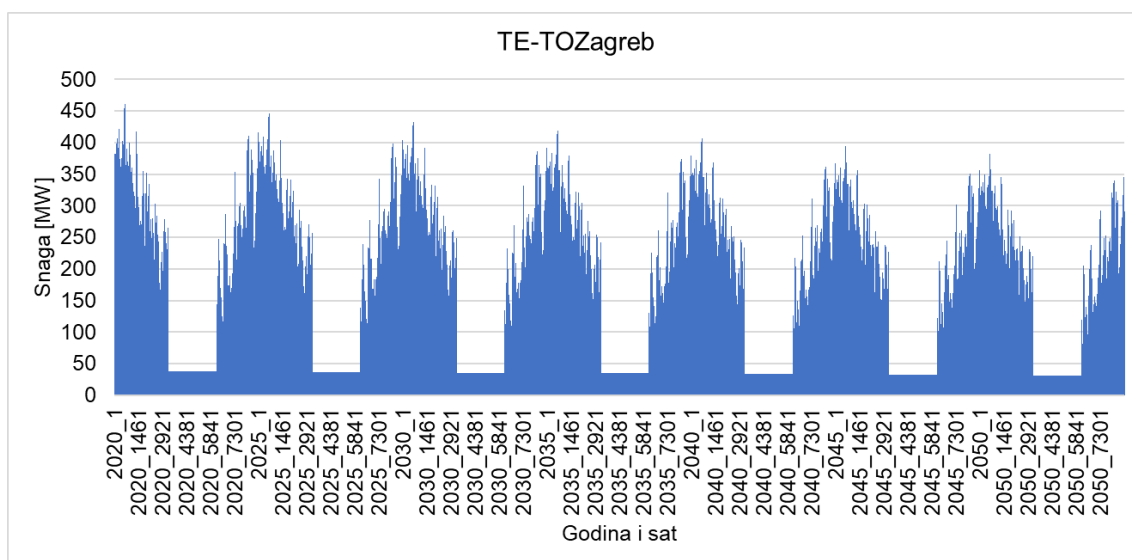
### 3. Sektor grijanja

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

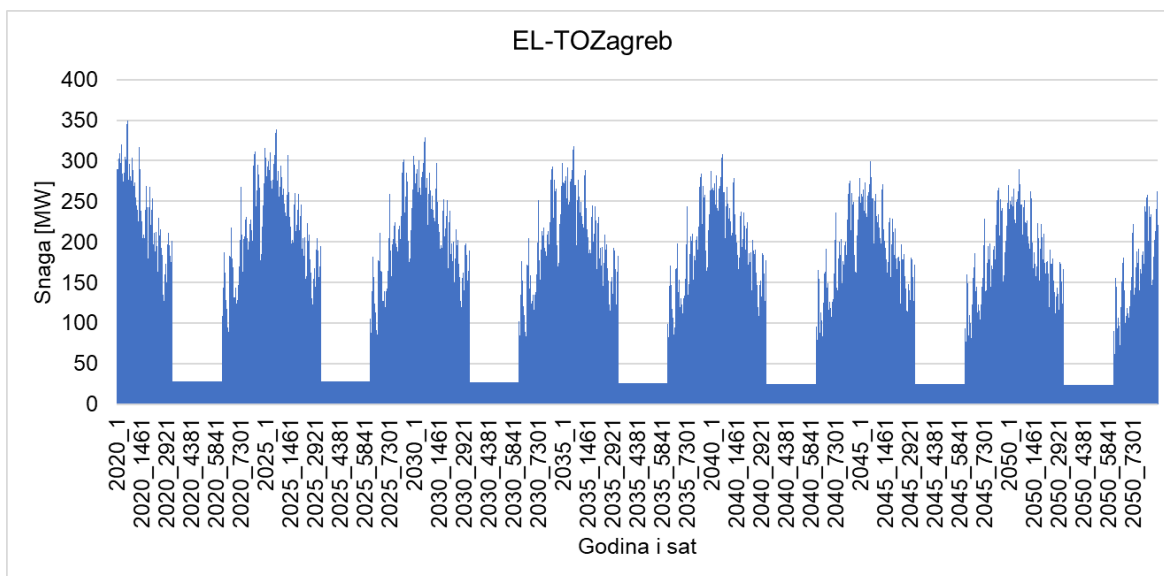


10 % potreba za toplinom. Svaka toplana ima vlastite ulazne podatke koji se sastoje od proizvodnih kapaciteta, učinkovitosti i distribucije potražnje za toplinom. Potražnja se svake godine smanjuje za 1 % što rezultira smanjenjem od 26 % do 2050. Modelirani su sustavi vezani na TE-TO Zagreb, EL-TO Zagreb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

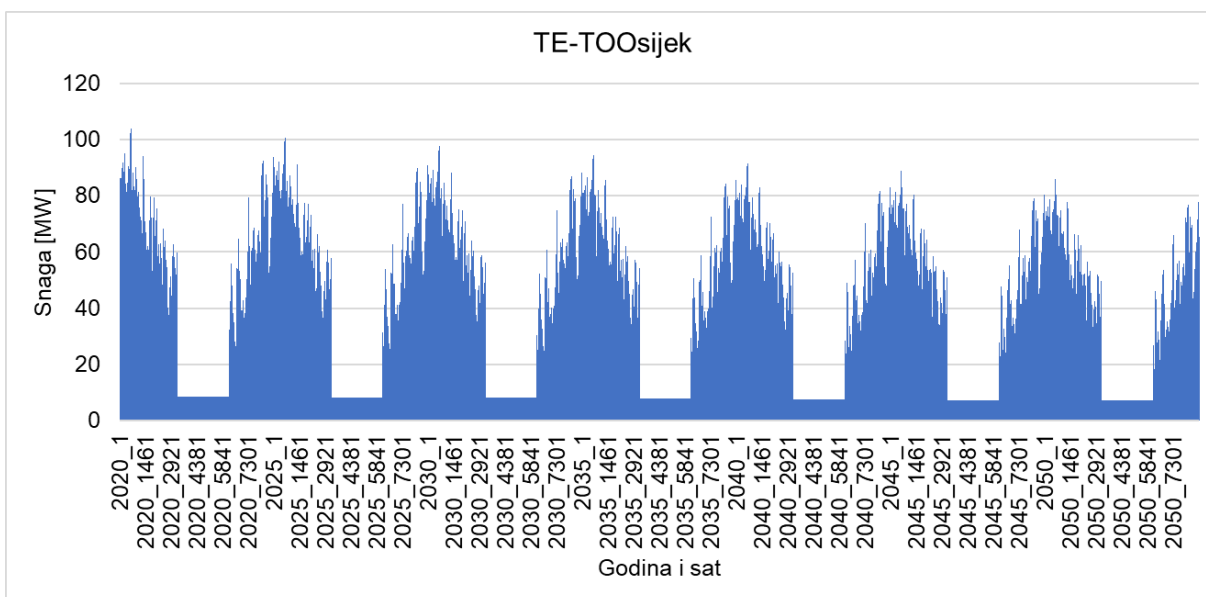


Slika 8. Potražnja za toplinskom energijom u centraliziranom toplinskom sustavu baziranom na TE-TOZagreb



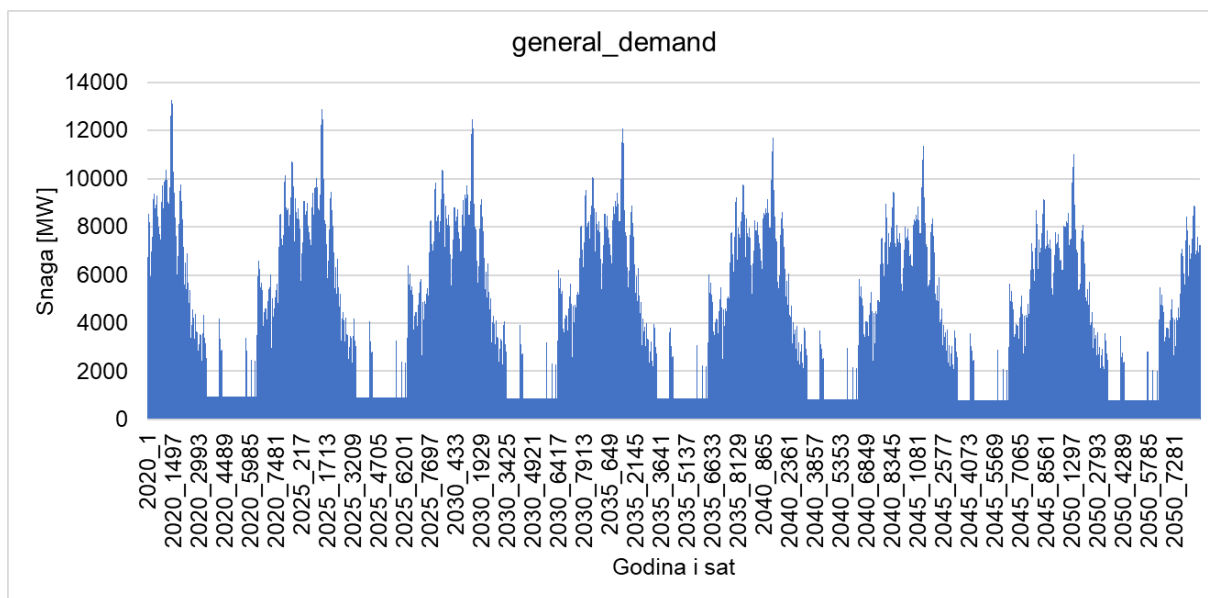
Slika 9. Potražnja za toplinskom energijom u centraliziranom toplinskom sustavu baziranom na EL-TOZagreb

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

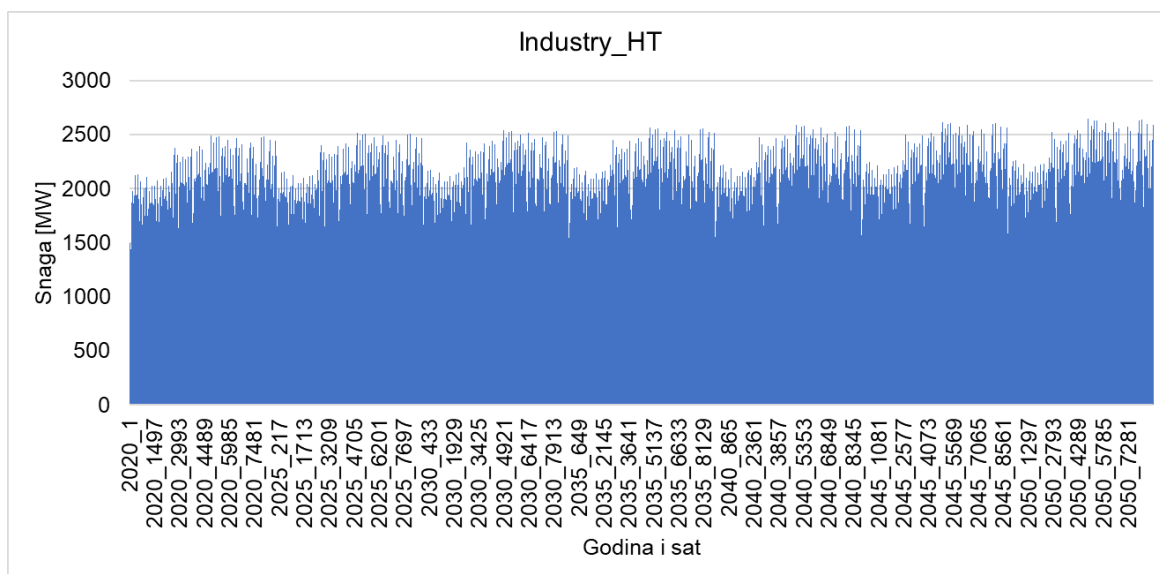
Ostatak toplinskih potreba je modeliran putem individualnih sustava grijanja, a korištenu distribuciju prikazuje Slika 11.



Slika 11. Potražnja za toplinskom energijom u individualnim toplinskim sustavima

#### 4. Sektor industrije

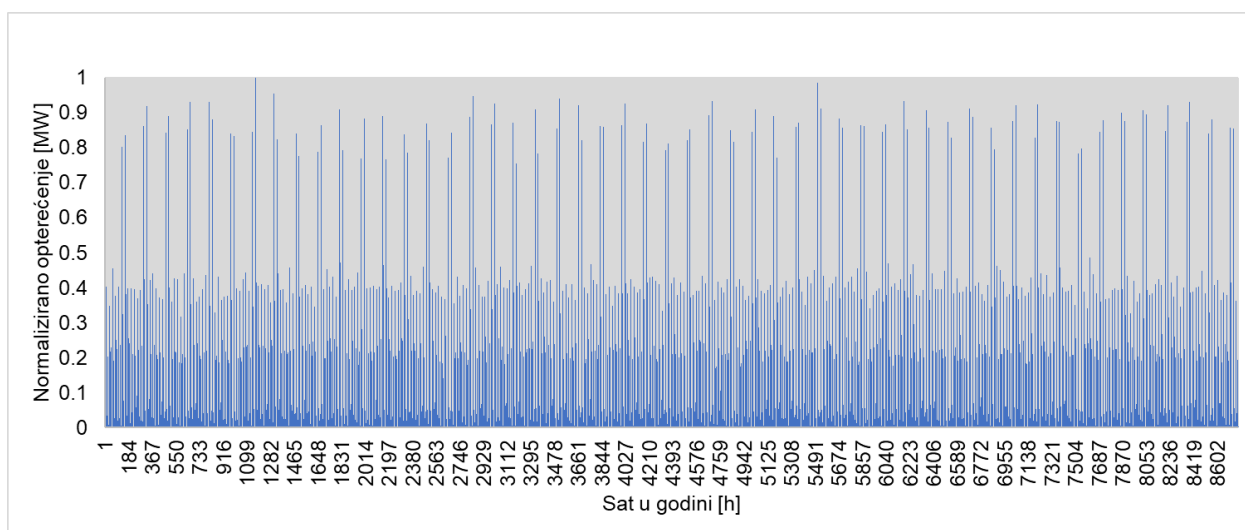
Predviđa se da će potražnja za energijom u industriji porasti za 1 % na godišnjoj razini, što je ukupno povećanje od 34 % do 2050. Ukupna industrijska potražnja za energijom u 2020. iznosi 9 TWh i opskrbljuje se udjelom prirodnog plina od 41 %, nafte od 46 %, ugljenom 6 % i biomase 7 %. Krivulja potražnje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



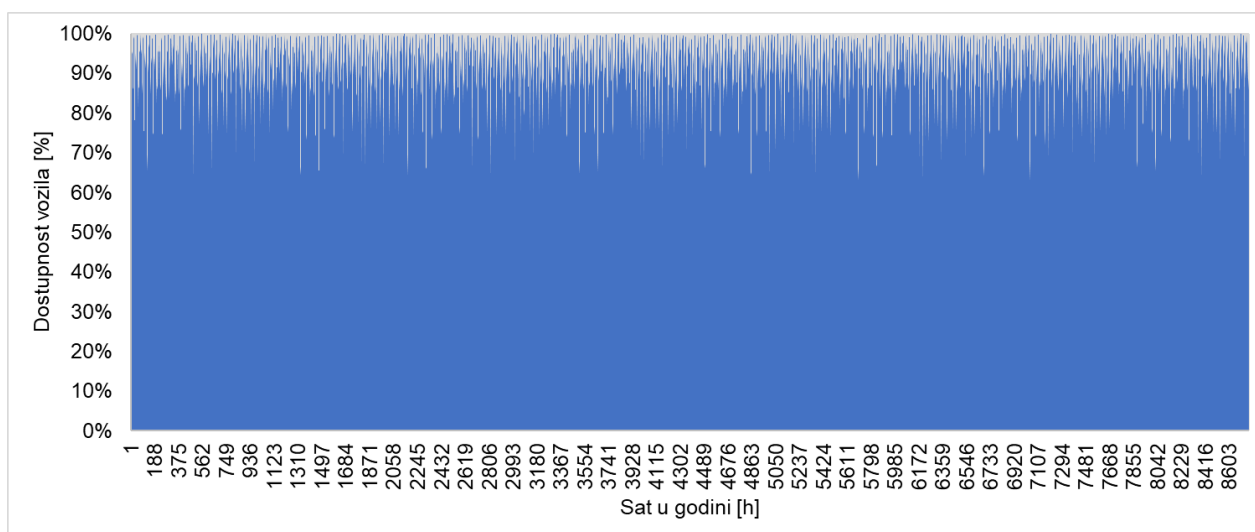
Slika 12. Potražnja energijom u sektoru industrije

## 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 [8]. 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

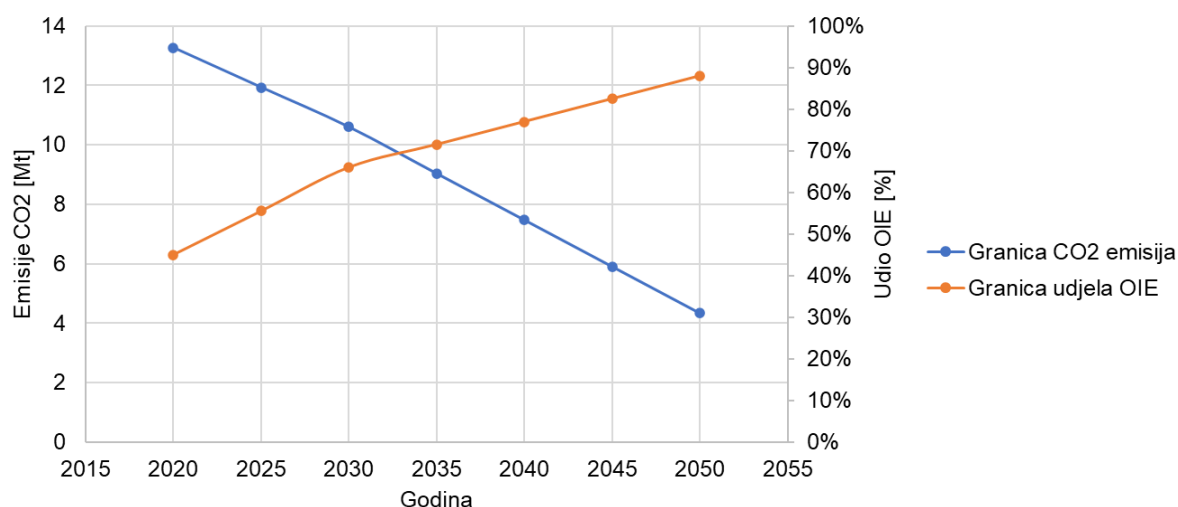


Slika 14. Dostupnost električnog vozila na punjaču

## 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. Slijede se ograničenja iz scenarija ubrzane tranzicije S1 Strategije energetske razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. navedena strategija predviđa smanjenje emisija do 2030 za 37.5 % u odnosu na razine iz 1990. te za 74.4 % do 2050. time se dolazi do ograničenja nešto višeg od 4 Mt 2050.
2. Udio obnovljivih izvora energije u električnoj energiji. - ograničenje se postepeno povećava i doseže 66 % do 2030. i 88% do 2050.
3. CEEP - kritična proizvodnja električne energije (CEEP) je ograničena na maksimalnih 5 % u odnosu na ukupnu potrošnju [3].



Slika 15. Ograničenja emisija i udjela obnovljivih izvora energije

Ostala ograničenja se u modelu uvode putem ograničenja kapaciteta investicija. instalacija, a time i maksimalna proizvodnja energije iz energije vjetra se ograničava na 9000 MW, dok se proizvodnja iz energije sunca ograničava na 8000 MW prema strategiji [2]. Time se postavljaju ograničenja na maksimalne investicije unutar određenog perioda kao i na maksimalne ukupne kapacitete.

## 6. Analiza izgradnje kapaciteta

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

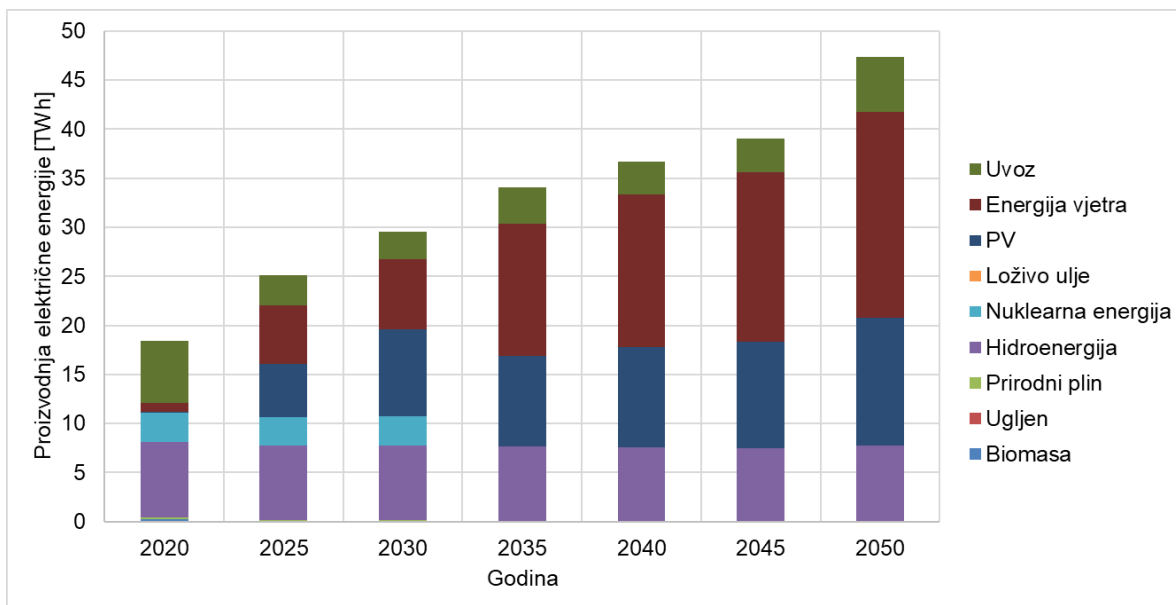
Rezultate investicija u obnovljive izvore energije prikazuje Tablica 7. Ukupni iznos instalacija solarnih i kapaciteta vjetra do 2050 iznosi 8331 MW za solar i 9502.4 MW za vjetar. Time se dolazi do ukupnih instalacija od 17833.94 MW u obnovljive izvore energije s uvjetom 5 % CEEPa. Valja primjetiti da je iznos ukupnih instalacija viši u odnosu na ograničenja od 9000 MW za energiju vjetra i 8000 MW za PV. Razlog tome je što se implementirano ograničenje odnosi na maksimalni kapacitet u određenoj godini, a ne ukupni kapacitet. Do razlike dolazi uslijed dekomisije starijih kapaciteta i ugradnje novih

Tablica 7. Investicije u proizvodne kapacitete

Godina	HR_Solar PP	HR_SolarHig h	HR_WindP P	HR_WindPP 1	HR_WindPP 2	HR_WindPP 3
2020	0	0	0	0	0	0
2025	0	0	0	887.43	1431.24	0
2030	0	3000	0	50.9	479.74	0
2035	286.77	1960	792.5	1133.96	1121.95	0
2040	821.68	0	437.93	384.8	217.22	0
2045	467.25	0	169.91	193.58	188.29	339.36
2050	1795.3	0	375.86	78.93	1219.3	0.04
Total	3371	4960	1776.2	2729.6	4657.74	339.4

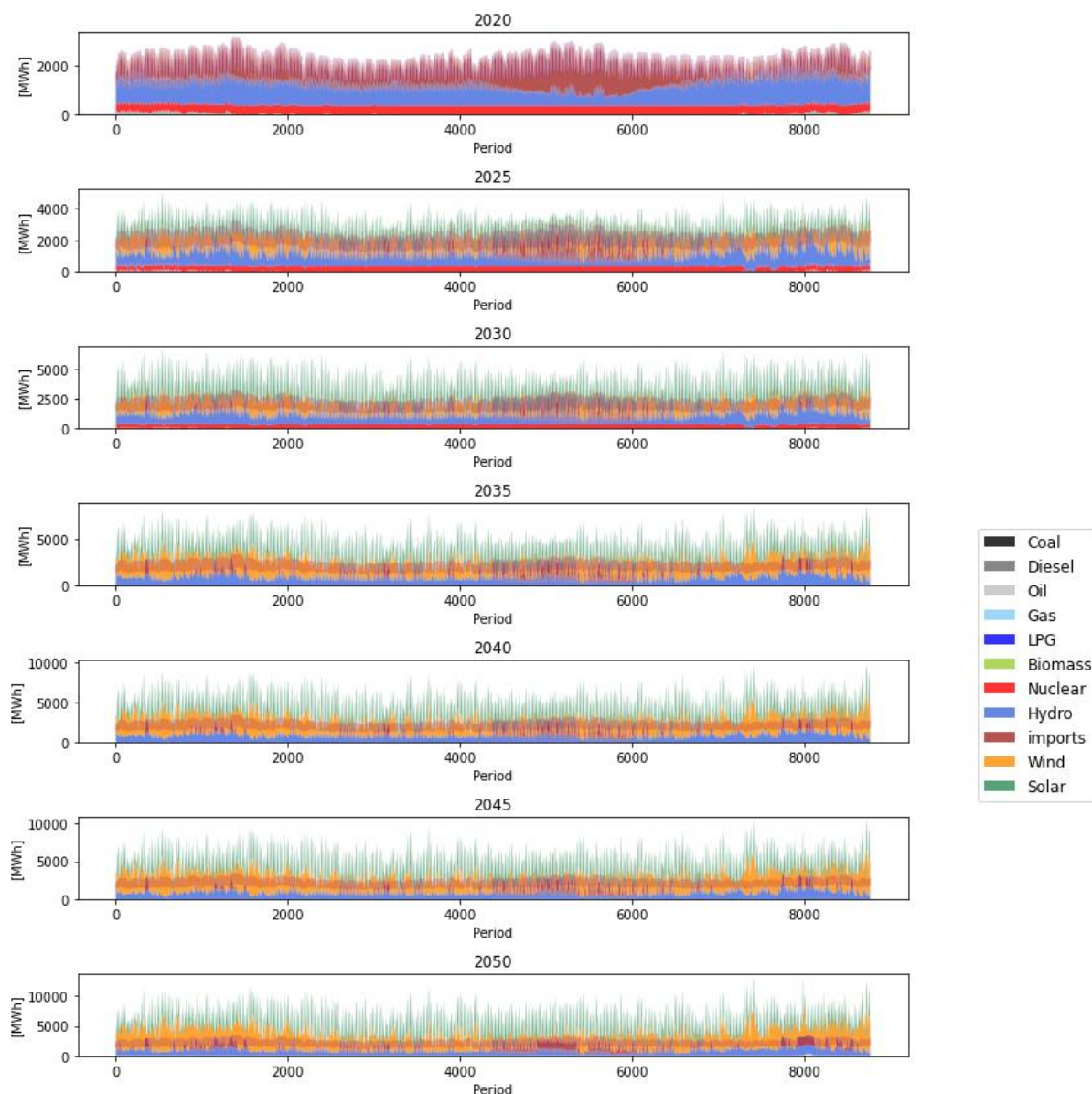
Proizvodnja električne energije se mijenja iz godine u godinu. Distribuciju proizvodnje prikazuje Slika 16. Vidljivo je da se proizvodnja iz obnovljivih izvora energije povećava, dok proizvodnja iz hidroenergije ostaje na približno jednakim razinama. Također se može uočiti smanjenje proizvodnje iz fosilnih goriva kao i iz nuklearne energije. Proizvodnja iz termoelektrana na fosilna goriva se smanjuje već na samom početku, 2020 uslijed preferiranja

uvoza energije umjesto korištenja fosilnih goriva. ostaje proizvodnja jedino iz kogeneracijskih postrojenja zbog potrebe za opskrbom centraliziranih toplinskih sustava toplinskom energijom iako se i taj dio smanjuje uvođenjem novih kotlova i dizalica topline u centralizirane toplinske sustave.



Slika 16. Proizvodnja električne energije

Rezultate satne distribucije proizvodnje su prikazuje Slika 17. 2020. sustavom dominiraju hidroelektrane te sve veći dio opskrbe električnom energijom preuzimaju varijabilni obnovljivi izvori energije. Do 2050 VOIE preuzima ulogu opskrbe oko 70 % potreba za električnom energijom.



Slika 17. Satna distribucija proizvodnje električne energije

U modelu se predviđa smanjenje potražnje za grijanjem tijekom godina kao rezultat povećanja energetske učinkovitosti. Otprilike 10 % potreba za grijanjem u Hrvatskoj se podmiruje putem centraliziranih toplinskih sustava. U rezultatima je vidljivo da se energetske potrebe u ovom sektoru podmiruju kombinacijom kogeneracijskih postrojenja, kotlova i dizalica topline. Do 2050. godine se udio električnih rješenja za grijanje u centraliziranim toplinskim sustavima povećava na približno 40 %, ostaje oko 10 % energije iz fosilnih goriva dok se ostatak opskrbljuje biomasom.



Kotlovi na fosilna goriva i biomasu su najzastupljeniji izvor topline u individualnim sustavima grijanja u prvoj godini modeliranja sustava (2020.). Situacija se počinje mijenjati nakon 2035. godine, kada sustav počinje dodavati dizalice topline u individualne sustave grijanja. Ekspanzija kapaciteta dizalica topline i električnih sustava grijanja se nastavlja do 2050 kad doseže udio od 70 % u opskrbi toplinskom energijom, a kotlovi na biomasu opskrbljuju preostali dio.

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. Stoga se tek nakon 2035. godine može vidjeti značajan doprinos instaliranim kapacitetima rješenja za grijanje iz obnovljivih izvora i istiskivanju kotlova na fosilna goriva. Primijenjeni sustavi grijanja također mogu pružiti fleksibilnost i odgovor potrošnje samog sustava. To im je omogućeno primjenom toplinske pohrane vezane uz svaki instalirani kapacitet. Obje vrste sustava preferiraju instalaciju dizalica topline zrak – voda u odnosu na ostale vrste električnih sustava grijanja.

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	5966.33	0	0	0	0	0	0
2025	254.63	0	0	0	0	0	0
2030	1473.24	0	0	0	0	0	0
2035	0	0	0	0	1151.16	0	1.83
2040	0	0	0	0	3151.08	17.51	0.75
2045	0	0	0	0	0	0	0
2050	0	0	0	0	4819.44	0	0.01
Total	7694.2	0	0	0	9121.68	17.51	2.59

Najveći dodaci kapaciteta u centraliziranim toplinskim sustavima se ostvaruju 2020. sa instalacijom kotlova na biomasu. Također, svake godine nakon 2025. se dodaju kapaciteti dizalica topline, s najvećim naglaskom na ATW dizalice topline. 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	305.79	0	0	0	0	0	0
2025	0	0	0	0	28.5	0.01	0
2030	0	0	0	0	77.09	0	0
2035	0	0	0	0	68.4	0	0
2040	0	0	0	0	26.93	0	0
2045	0	0	0	0	21.07	0	0
2050	0	0	0	0	71.08	0	0
Total	305.79	0	0	0	293.07	0.01	0

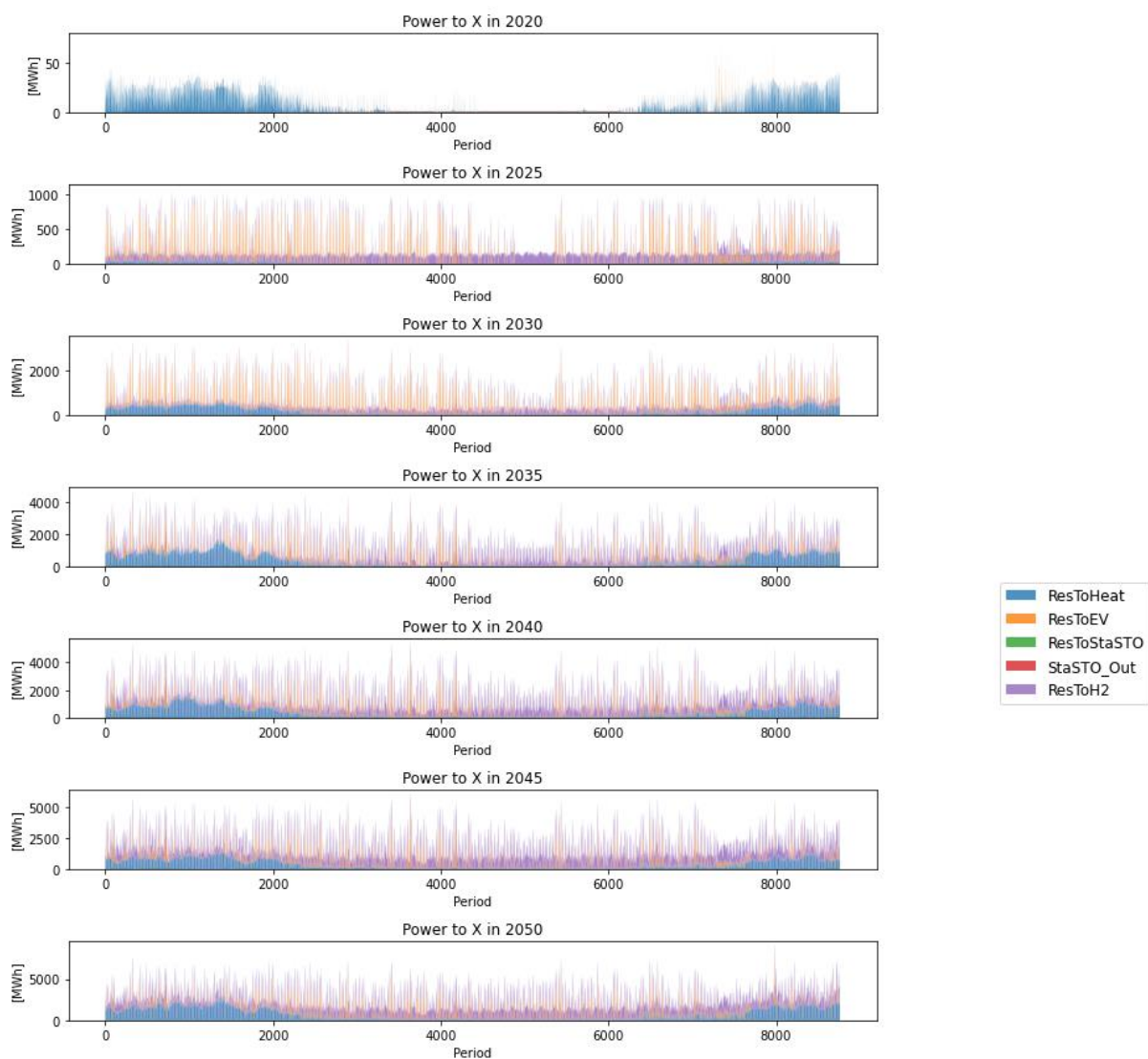
Kapacitete investicija u različite sustave pohrane energije i tehnologije vodika prikazuje Tablica 10. Vidljiva je potreba za instalacijom alkalnih elektrolizatora i pohrane vodika. Uz korištenje tehnologija proizvodnje vodika i njegove pohrane, dolazi do značajnog doprinosa fleksibilnosti samog sustava. Ovaj scenarij ne zahtjeva potpunu dekarbonizaciju pa stoga nije potrebno investirati i u ostale tehnologije kao što su stacionarni baterijski sustavi pohrane ili gorive članke. Investicija u elektrolizatore i pohranu vodika je preferirana zbog potrebe za korištenjem vodika u sektoru industrije. Također, do nedostatka investicija u druge sustave dolazi i zbog korištenja tehnologija kao što su baterije električnih vozila koje se koriste u smislu odgovora potrošnje variranjem procesa punjenja, ali i kao pohrana energije uz V2G tehnologiju. Zbog tog sustav izbjegava investiciju u nove kapacitete koji bi bili isključivo namijenjeni balansiranju energetskog sustava te odlučuje koristiti već postojeće tehnologije. Značajan dio fleksibilnosti

je također pružen od strane toplinskih sustava koji su u ovom scenariju velikim djelom bazirani na električnim sustavima kao što su dizalice topline.

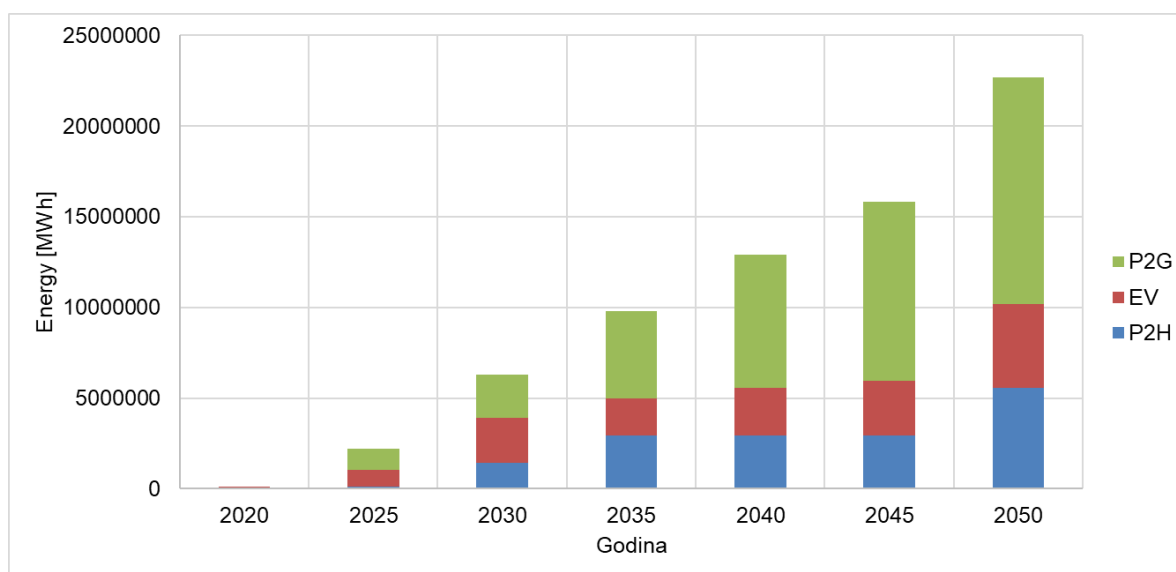
Tablica 10. Investicija u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije

Godina	Alkaline ELY (MW)	PEM ELY (MW)	SOEC (MW)	PEMFC (MW)	SOFC (MW)	H <sub>2</sub> storage (MWh)	Li-ion batteries (MWh)
2020	0	0	0	0	0	0	0
2025	99.5	0	0	0	0	35.75	0
2030	147.76	0	0	0	0	475.93	0
2035	529.95	0	0	0	0	2840.24	0
2040	292.62	0	0	0	0	0	0
2045	230.05	0	0	0	0	0	0
2050	129.5	0	0	0	0	0	0
Total	1429.38	0	0	0	0	3351.92	0

Rad Power to X opcija prikazuje Slika 18. Vidljiva je evolucija sustava te postepeno dodavanje novih vrsta tehnologija. Tako se na početku veći dio power to X tehnologija odnosi na sustave grijanja, dok se postepeno uvodi elektrifikacija sektora transporta te naposljetku i proizvodnja vodika koja preuzima najveći dio potrošnje energije P2X opcija. Sam odnos između zastupljenosti pojedinih Power-to-X tehnologija prikazuje Slika 19. Vrijedi spomenuti situacije kao što je potrošnja energije električnih vozila 2030 i 2035. godine. Vidljivo je smanjenje potrošnje. Do smanjenja dolazi zbog ulaska većih kapaciteta Power to Gas tehnologije koja preuzima na sebe dio zadataka Vehicle to Grid tehnologije te time smanjuje potrošnju energije u vozilima. Pregledom navedene slike i Slika 16 se dolazi do zaključka da porast potražnje električne energije u najvećoj mjeri uzrokuje povećano korištenje „power-to-X“ tehnologija te posljedično prebacivanje sektora na opskrbu energijom baziranoj na električnoj energiji.

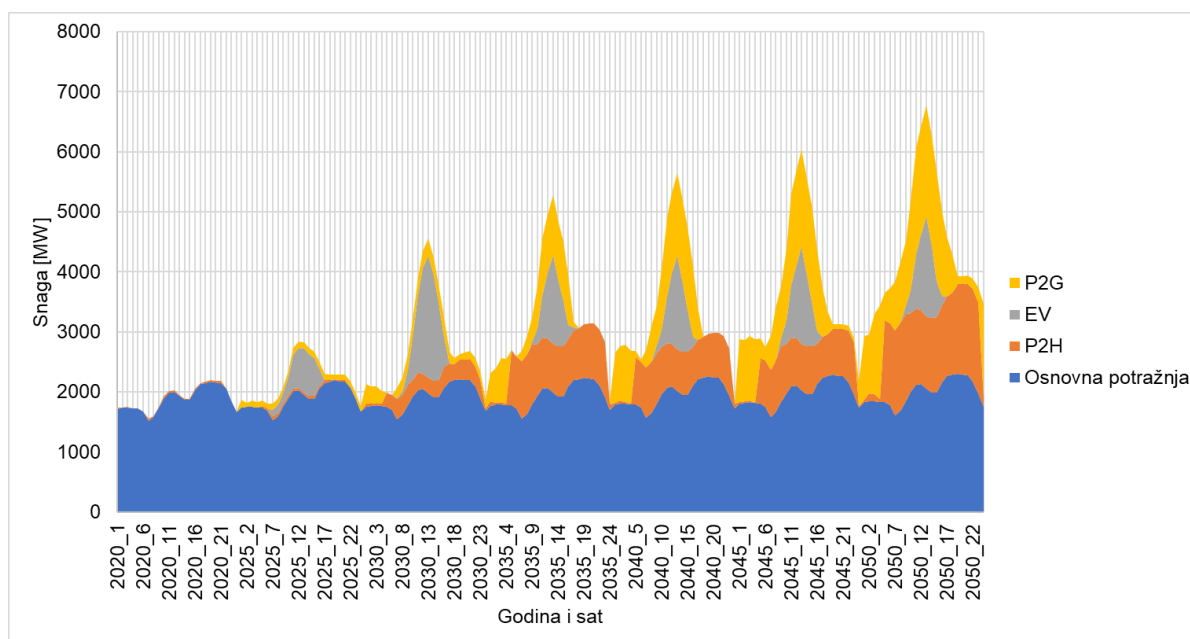


Slika 18. Rad Power to X tehnologija



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

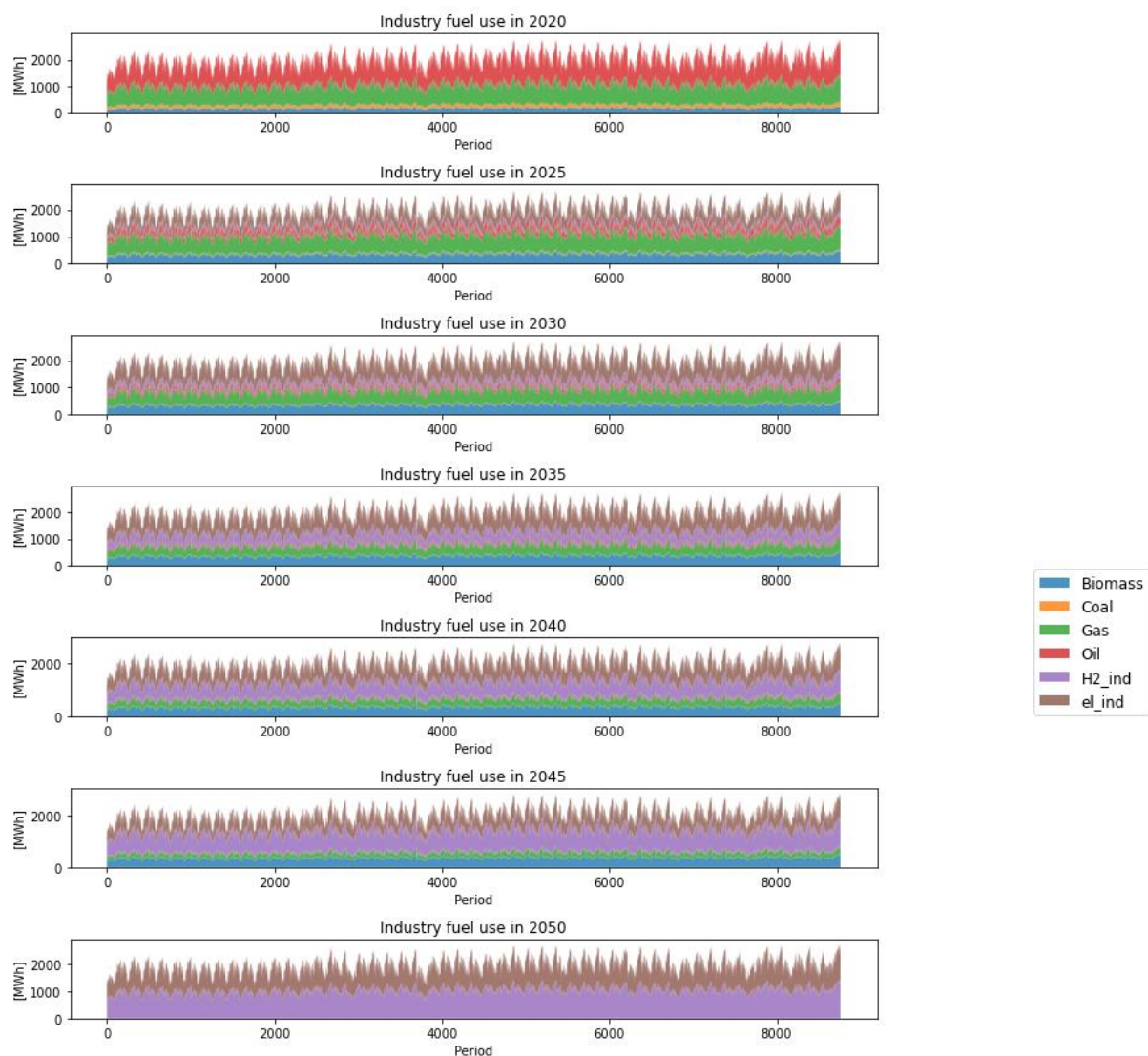
Dodatan prikaz raspodjele potrošnje električne energije prikazuje Slika 19. Prikazani su rezultati samo za prvi dan u godini.



Slika 20. Potrošnja energije u sektorima tokom prvog dana u godini

Sektor industrije prelazi na potpuno dekarbonizirani sustav do 2050. godine iako nije postavljen uvjet potpune dekarbonizacije. Kao što prikazuje Slika 21, uloga fosilnih goriva se postepeno smanjuje te dolazi do potpunog prelaska sustava na kombinaciju električne energije i vodika. Potrebno je napomenuti da su udjeli izvora energije u svakom satu jednaki tokom godine kako

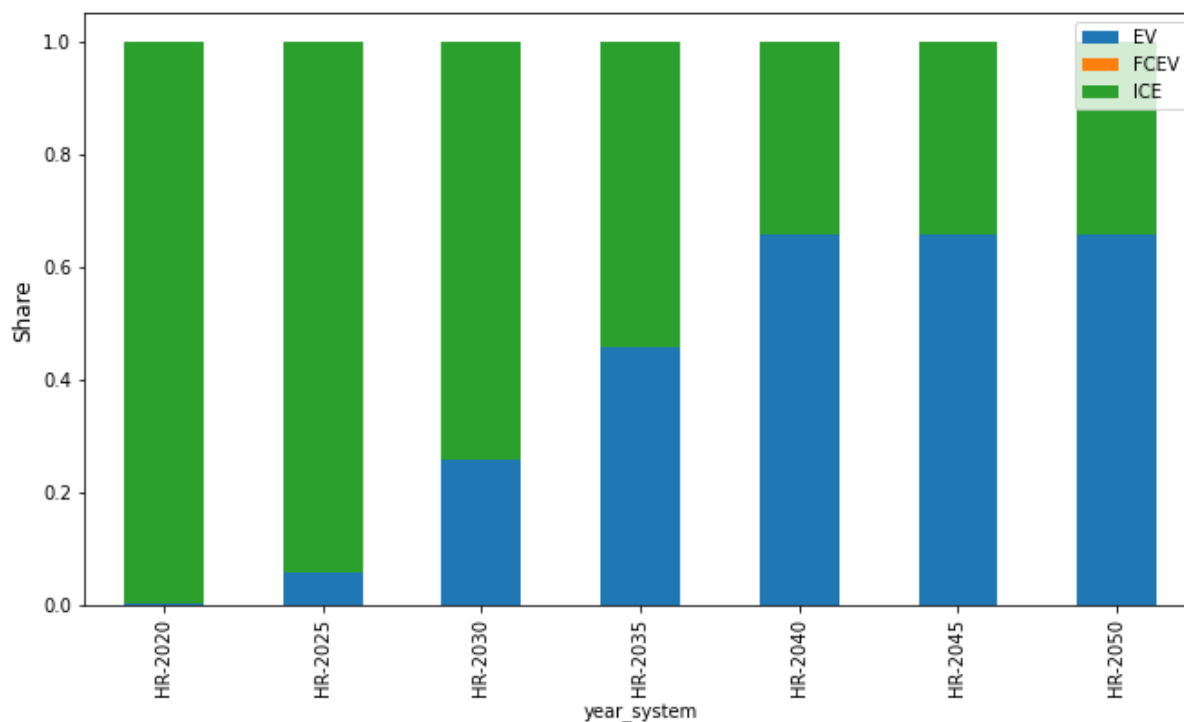
bi se spriječilo prevladavanje nekog od izvora energije u pojedinim satima uslijed velike dostupnosti resursa.



Slika 21. Energija u industriji

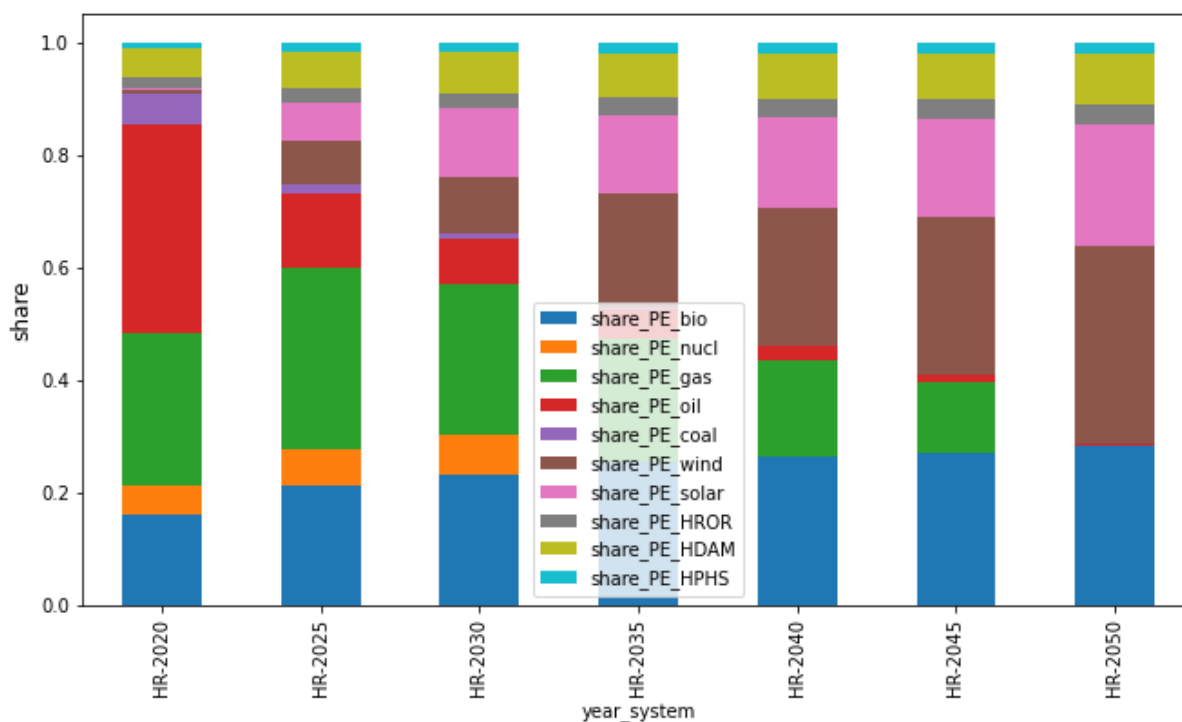
Model slijedi ograničenje udjela električnih vozila u sektoru transporta na 85 % do 2050 prema Strategiji energetskega razvoja Republike Hrvatske za 2030. s pogledom na 2050 [2]. Uslijed sve povoljnijih cijena i potreba za dekarbonizacijom dolazi do prelaska transporta na električna vozila kao što prikazuje Slika 22. Ipak, dio sektora ostaje koristiti vozila s motorima s unutrašnjim izgaranjem. Također, alternativa korištenju električnih vozila su vozila na vodik koja zahtijevaju značajno više investicije. Stoga model odlučuje zadržati dio vozila s motorima s unutrašnjim sagorijevanjem. Adaptacija električnih vozila kao nove tehnologije je također ograničena simulacijom dostupnosti proizvodnih kapaciteta za opskrbom tržišta novom

tehnologijom. Naime, kako bi se omogućila masovnija proizvodnja električnih vozila, potrebno je izgraditi nove proizvodne linije ili prenamijeniti postojeće. Također, potrebno je osigurati opskrbne lance kritičnih minerala i sirovina koji predstavljaju ograničenja u proizvodnji. Navedene transformacije zahtijevaju vrijeme potrebno za implementaciju.



Slika 22. Sektor transporta

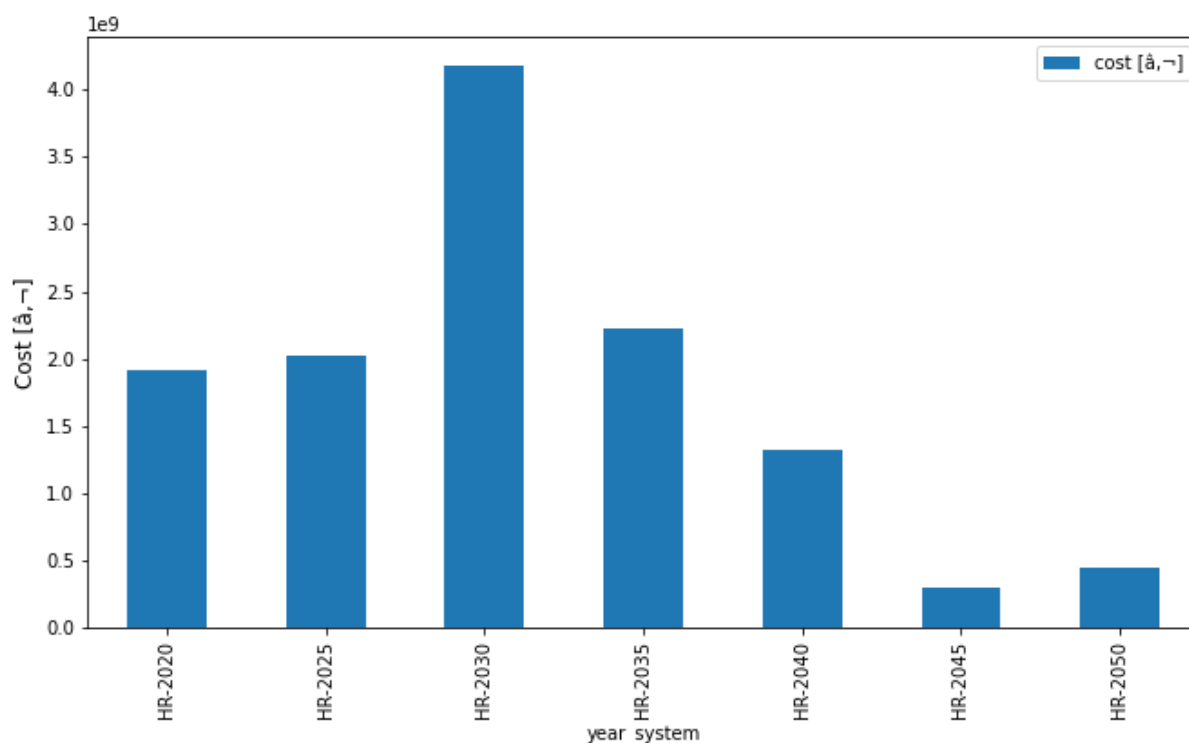
Udjele bilanca primarne energije prikazuje Slika 23. Vidljivo je smanjenje korištenja fosilnih goriva, prvenstveno nafte i ugljena, dok se udio prirodnog plina u primarnoj energiji smanjuje tek od 2030. godine. U isto vrijeme dolazi do povećanja udjela varijabilnih obnovljivih izvora energije u primarnoj 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 23. Udjeli primarne energije

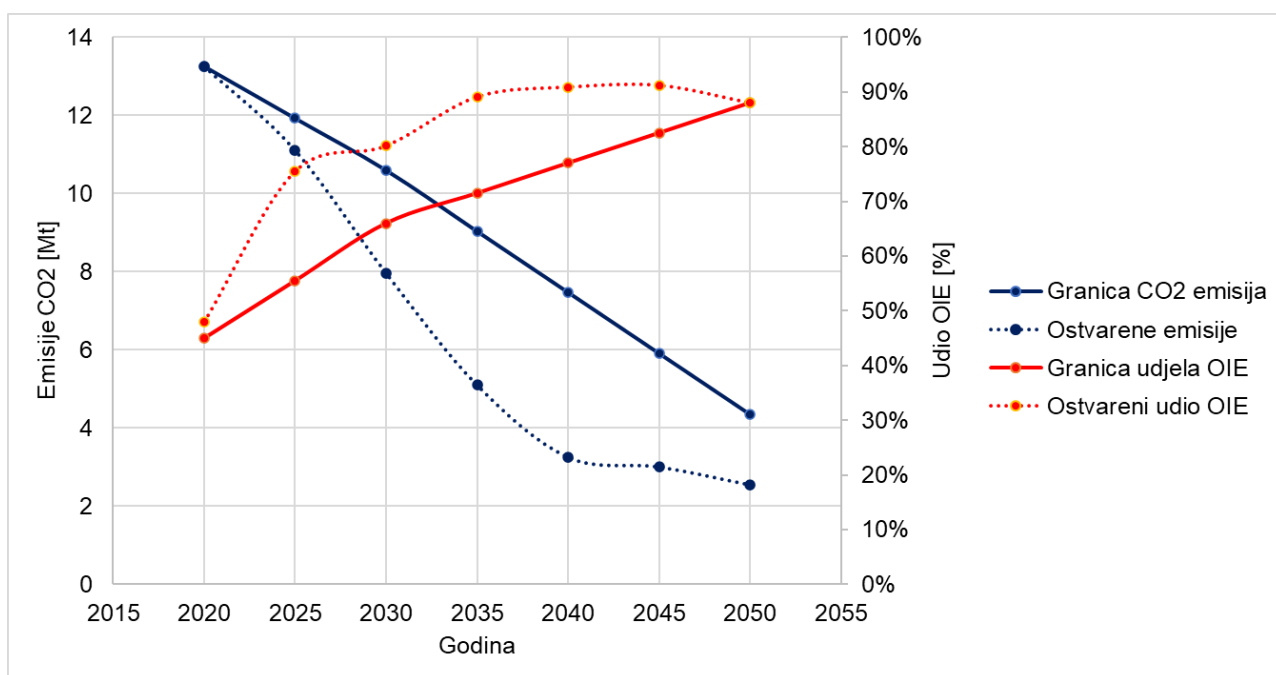
Slika 24. prikazuje trošak sustava po godinama. Vidljivo je kako u prvim godinama sustav ima visoke troškove kao kombinacija korištenja goriva i investicija u nove kapacitete. Uloga investicija je prvenstveno vidljiva za godinu 2030 što je posljedica velikih investicija u toj godini. Također, vidljivo je značajno smanjenje troškova nakon 2040. godine. U tim godinama dolazi do smanjenja potrošnje fosilnih goriva te sustavom prevladavaju obnovljivi izvori energije.





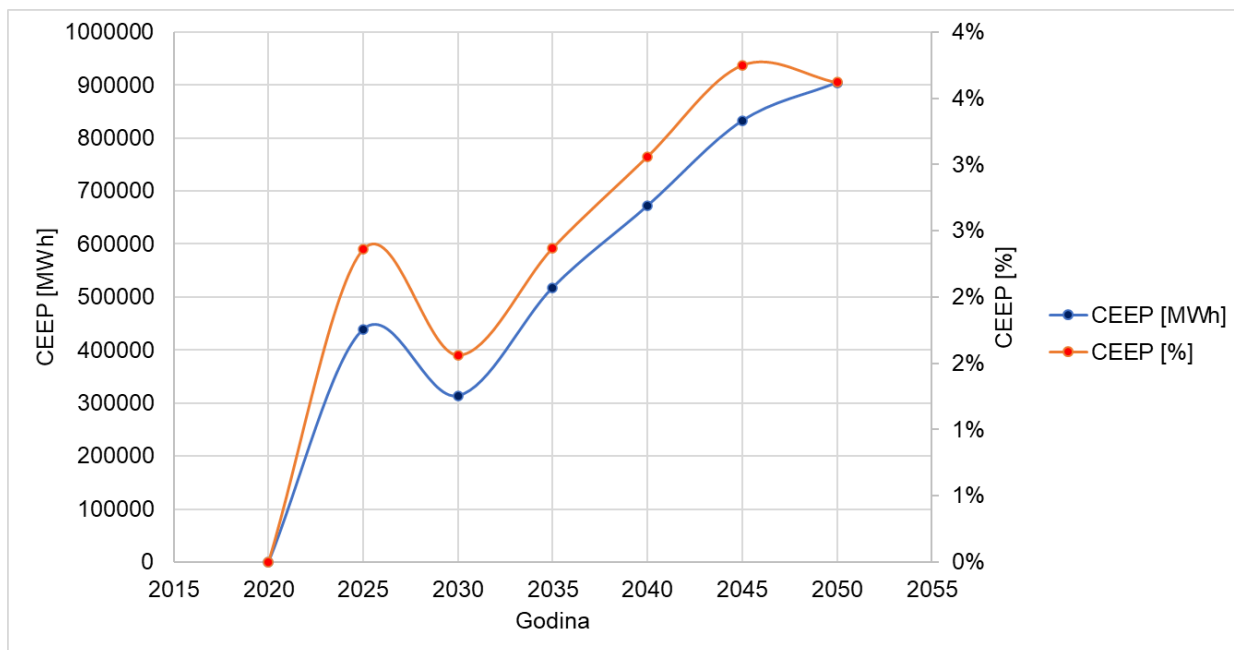
Slika 24. Troškovi sustava po godinama

Odnos između uvedenih ciljeva u pogledu emisija CO<sub>2</sub> i udjela obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije prikazuje Slika 25. 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 25. Usporedba ostvarenih emisija i udjela OIE u odnosu na ciljeve

Model također poštuje i ograničenje prekomjerne proizvodnje električne energije. Slika 26. 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 26. CEEP

## 7. Reference

- [1] H2RES, dostupno na: <https://h2res.org/>, pristupljeno 15.6.2022.
- [2] Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_03\\_25\\_602.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_25_602.html), pristupljeno 15.6.2022.
- [3] Lund, H, Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions
- [4] Dispa-SET model, dostupno na: <http://www.dispaset.eu/en/latest/>, pristupljeno 15.6.2022.
- [5] International Renewable Energy, dostupno na: <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>, pristupljeno 15.6.2022.
- [6] Međunarodna energetska agencija, dostupno na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD>, pristupljeno 15.6.2022.
- [7] Entso-e, dostupno na: <https://www.entsoe.eu/>, pristupljeno 15.6.2022.
- [8] 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.