Analiza osjetljivosti budućih konfiguracija energetskog sustava s obzirom na dostupnost resursa

Beljan, Doris

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:259804

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

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

Doris Beljan

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Doris Beljan

Zagreb, 2022. godina.

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

Zahvaljujem se projektu INTERENERGY (IP-2019-04-9482) Istraživanje puteva energetske tranzicije - međuovisnost "power-to-X" tehnologija, tehnologija odgovora potrošnje i povezivanja tržišta energijom na pristupu literaturi.

Također, zahvaljujem se prof. dr. sc. Nevenu Duiću na mentorstvu te asistentu Antunu Pfeiferu, mag. ing. mech. i Luki Hercu, mag. ing. meech. na pomoći i susretljivosti prilikom izrade ovog rada.

Hvala i svima vama koji ste uvijek uz mene.

Doris Beljan

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, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodostrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 22 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 22 -**	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Doris Beljan** JMBAG: 0035210136

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza osjetljivosti budućih konfiguracija energetskog sustava s obzirom na dostupnost resursa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Sensitivity analysis of future energy system configurations with regard to resource availability**

Opis zadatka:

Republika Hrvatska kao država članica Europske Unije primjenjuje jednake ciljeve energetske tranzicije čime se želi do 2050. postići klimatska neutralnost. Dugoročno energetsko planiranje treba dati odgovor na pitanje potrebnih investicija kako bi se zadovoljili ciljevi tranzicije s tehničke strane, ali je potrebno provesti i optimizaciju u vidu postizanja što nižih ukupnih troškova energetskog sustava. Tranzicija energetskog sustava podrazumijeva tranziciju sektora proizvodnje električne energije, grijanja, industrije i transporta. Dostupnost resursa varira na godišnjoj razini kao i pod dugoročnim promjenama uzrokovanim klimatskim promjenama. Time promjene vremenskih uvjeta kao što su promjene vodenih ciklusa, dostupnosti energije vjetra i promjene u osunčanosti, uzrokuju i posljedice vidljive u radu samih postrojenja. Iz tog je razloga potrebno provesti detaljnu analizu mogućnosti primjene varijabilnih obnovljivih izvora energije u različitim scenarijima u pogledu vremenskih uvjeta. U okviru rada, stoga je potrebno:

1. Napraviti pregled tehnologija proizvodnje energije iz obnovljivih izvora energije i pregled primjenjivih tehnologija u svim sektorima potrošnje koje se mogu koristiti u svrhu dekarbonizacije sustava te pružanja fleksibilnosti.
2. Napraviti pregled mogućih kretanja dostupnosti resursa obnovljivih izvora energije od 2020 do 2050. godine. Poseban naglasak je potrebno staviti na ekstremne uvjete.
3. Napraviti pregled povijesnih uzoraka kretanja dostupnosti resursa.
4. Izraditi model energetskog sustava Republike Hrvatske u računalnom programu za energetsko planiranje - H2RES.
5. Prikazati rezultate scenarijskih analiza u ovisnosti o korištenim krivuljama i razinama dostupnosti resursa.
6. Usporediti rezultate u vidu potrebnih investicija i korištenih tehnologija.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
5. svibnja 2022.	7. srpnja 2022.	18. – 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Neven Duić Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA VI
POPIS KRATICA VII
POPIS OZNAKA VIII
SAŽETAK IX
SUMMARY X
1. UVOD 1
2. PREGLED TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE ENERGIJE IZ OIE 5
2.1. Energija sunca 5
2.1.1. Fotonaponski sustav 5
2.1.2. Sunčevi toplinski sustav 6
2.2. Energija vjetra 8
2.3. Hidroenergija 10
2.4. Energija plime i oseke 13
2.5. Energija valova 15
2.6. Iskorištavanje toplinske energije oceana 18
2.7. Geotermalna energija 19
2.8. Biomasa i otpad 20
3. PREGLED TEHNOLOGIJA FLEKSIBILIZACIJE U SEKTORU POTROŠNJE 23
3.1. Fleksibilnost potrošnje 23
3.1.1. Pretvorba električne energije u toplinsku energiju 24
3.1.2. Pretvorba električne energije u vodik 26
3.1.3. Električna vozila 26
3.1.4. Pametni uređaji 27
3.1.5. Industrijski procesi 28
3.2. Tehnologije pohrane električne energije 28
3.2.1. Mehanički sustavi za pohranu energije: 29
3.2.2. Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije: 29
3.2.3. Kemijski sustavi za pohranu električne energije 30
3.2.4. Električni sustavi za pohranu električne energije 31
3.2.5. Termički sustavi za pohranu električne energije 32
4. METODE 33
4.1. H2RES 33
4.1.1. Struktura H2RES-a 36
4.1.2. Ulazni podaci u H2RES-u 41
4.2. Izrada krivulja 45
4.2.1. Modeliranje potrošnje električne energije 45
4.2.2. Modeliranje toplinskog opterećenja 45
4.2.3. Modeliranje rashladnog opterećenja 47

5. PRIMJENA NA ENERGETSKOM SEKTORU REPUBLIKE HRVATSKE 49
5.1. Povijesni podaci dostupnosti resursa 50
5.1.1. Povijesni podaci za Zagreb 51
5.1.2. Povijesni podaci za Osijek 53
5.1.3. Povijesni podaci za Rijeku 55
5.1.4. Povijesni podaci za Zadar 57
5.1.5. Povijesni podaci za Split 59
5.2. Buduće prognoze dostupnosti resursa 61
5.2.1. Temperatura zraka 62
5.2.2. Oborine 62
5.2.3. Evapotranspiracija 63
5.2.4. Brzina vjetra na 10 m visine 63
5.2.5. Sunčevo zračenje 64
5.2.6. Ekstremni vremenski uvjeti 65
5.3. Ulazni podaci u H2RES 67
5.4. Ulazne datoteke 71
5.4.1. Podaci o proizvodnim kapacitetima elektroenergetskog sustava 71
5.4.2. Potražnja električne energije 74
5.4.3. Potražnja toplinske energije 75
5.4.4. Potražnja rashladne energije 77
5.4.5. Potražnja vodika 77
5.4.6. Potražnja električnih vozila 77
5.4.7. Varijabilni troškovi goriva 78
5.4.8. Faktori dostupnosti obnovljivih izvora energije 78
5.4.9. Dotoci vode u akumulacije 78
5.4.10. Uvoz/izvoz 79
5.4.11. Fleksibilne tehnologije 79
6. SCENARIJI DOSTUPNOSTI RESURSA 80
6.1. Scenarij bez utjecaja klimatskih promjena 80
6.2. Scenarij očekivanog razvoja 80
6.3. Scenarij s većom učestalosti ekstremnih vremenskih uvjeta 83
7. REZULTATI 86
7.1. Rezultati scenarija bez utjecaja klimatskih promjena 86
7.2. Rezultati scenarija očekivanog razvoja 93
7.3. Rezultati scenarija s većom učestalosti ekstremnih uvjeta 100
7.4. Usporedba scenarija 106
8. ZAKLJUČAK 119
LITERATURA 121
PRILOZI 126

POPIS SLIKA

Slika 1. Ključni ciljevi energetske strategije EU do 2030. [2] 1
Slika 2. Vremenski okvir razvoja NECP-a država članica [2] 2
Slika 3. Pet stupova strategije Energetske unije [2] 3
Slika 4. Shematski prikaz fotonaponskog sustava spojenog na elektroenergetsku mrežu [17] 6
Slika 5. Sunčev toplinski sustav [17] 7
Slika 6. Sile uzgona – F_u i otpora - F_o na profile lopatica vjetroagregata [17] 9
Slika 7. Protočna hidroelektrana [19] 11
Slika 8. Akumulacijska hidroelektrana s glavnim komponentama [19] 12
Slika 9. Crpna hidroelektrana [19] 13
Slika 10. Princip rada plimne brane [21] 14
Slika 11. Shematski prikaz Tapchan sustava za hvatanje valova izgrađen u Norveškoj [22] 16
Slika 12. Shematski prikaz uređaja za hvatanje energije valova upotrebom oscilirajućeg vodenog stupca [22] 17
Slika 13. Prikaz postrojenja valnog profila za hvatanje energije valova [22] 17
Slika 14. Shematski prikaz OTEC sustava zatvorenog ciklusa [22] 18
Slika 15. Upotreba geotermalne energije kaskadnom primjenom [17] 19
Slika 16. Shema mogućih koraka pretvorbe biomase [17] 21
Slika 17. Struktura energetskog sustava prije i danas s različitom ulogom potrošnje [23] .. 23
Slika 18. Tehnologije fleksibilnosti potrošnje po krajnjim korisnicima [23] 24
Slika 19. Načini pametnog punjenja električnih vozila [23] 27
Slika 20. Različiti načini sustava pohrane energije 28
Slika 21. Izgled korisničkog sučelja H2RES-a 35
Slika 22. Shema H2RES modela [27] 35
Slika 23. Shema postrojenja za proizvodnju električne energije u H2RES-u [26] 37
Slika 24. Shema toplinskog sektora u H2RES-u [26] 38
Slika 25. Shema Industrijskog sektora u H2RES-u [27] 39
Slika 26. Shema spremnika električne energije i električnih vozila u H2RES-u [26] 40
Slika 27. Shema sustava vodika u H2RES-u [26] 41
Slika 28. Primjer Excel datoteke za unos podataka o fleksibilnim tehnologijama [27]. 42
Slika 29. Raspodjela potrošne tople vode tijekom dana [49] 47
Slika 30. Projekcija kretanja broja stanovnika Republike Hrvatske do 2050. 49
Slika 31. Gradovi za koje su prikazani povijesni meteorološki podaci 50
Slika 32. Temperatura zraka u Zagrebu 51
Slika 33. Solarno zračenje u Zagrebu 51
Slika 34. Oborine u Zagrebu 52
Slika 35. Brzine vjetra u Zagrebu 52
Slika 36. Temperatura zraka u Osijeku 53
Slika 37. Solarno zračenje u Osijeku 53
Slika 38. Oborine u Osijeku 54
Slika 39. Brzina vjetra u Osijeku 54
Slika 40. Temperatura zraka u Rijeci 55
Slika 41. Solarno zračenje u Rijeci 55
Slika 42. Oborine u Rijeci 56
Slika 43. Brzina vjetra u Rijeci 56
Slika 44. Temperatura zraka u Zadru 57

Slika 45. Solarno zračenje u Zadru ... 57
Slika 46. Oborine u Zadru ... 58
Slika 47. Brzina vjetra u Zadru ... 58
Slika 48. Temperatura zraka u Splitu ... 59
Slika 49. Solarno zračenje u Splitu ... 59
Slika 50. Oborine u Splitu ... 60
Slika 51. Brzina vjetra u Splitu ... 60
Slika 52. Srednja gustoća snage vjetra na 80 m za Republiku Hrvatsku [29] ... 73
Slika 53. Potencijal proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana na području Republike Hrvatske [35] ... 74
Slika 54. Potrošnja električne energije u baznoj godini ... 75
Slika 55. Potražnja toplinske energije u baznoj godini ... 76
Slika 56. Promjena potrošnje toplinske energije u sektorima do 2050. godine ... 76
Slika 57. Potražnja rashladne energije u baznoj godini ... 77
Slika 58. Dotoci u akumulacije u baznoj godini ... 79
Slika 59. Promjena dotoka u akumulacijske hidroelektrane ... 81
Slika 60. Promjena faktora opterećenja hidroelektrana ... 82
Slika 61. Broj kišnih razdoblja do 2050. godine ... 84
Slika 62. Broj sušnih razdoblja do 2050. godine ... 85
Slika 63. Proizvodnja električne energije u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena ... 87
Slika 64. Proizvodnja toplinske energije u individualnim sustavima grijanja u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena ... 88
Slika 65. Proizvodnja toplinske energije u CTS-u u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena ... 89
Slika 66. Rad Power to X tehnologija u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena ... 91
Slika 67. Upotreba goriva u industriji u scenariju bez klimatskih promjena ... 92
Slika 68. Prikaz ostvarenih ciljeva u scenariju bez klimatskih promjena ... 93
Slika 69. Proizvodnja električne energije u scenariju očekivanog razvoja ... 94
Slika 70. Proizvodnja toplinske energije u individualnim sustavima grijanja u scenariju očekivanog razvoja ... 95
Slika 71. Proizvodnja toplinske energije u CTS-u u scenariju očekivanog razvoja ... 96
Slika 72. Rad Power to X tehnologija u scenariju očekivanog razvoja ... 98
Slika 73. Upotreba goriva u industriji u scenariju očekivanog razvoja ... 99
Slika 74. Prikaz ostvarenih ciljeva u scenariju očekivanog razvoja ... 99
Slika 75. Proizvodnja električne energije u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta ... 101
Slika 76. Proizvodnja toplinske energije u individualnim sustavima grijanja u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta ... 101
Slika 77. Proizvodnja toplinske energije u CTS-u u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta ... 102
Slika 78. Rad Power to X tehnologija u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta 105
Slika 79. Upotreba goriva u industriji u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta 105
Slika 80. Prikaz ostvarenih ciljeva u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta ... 106
Slika 81. Instalirani kapaciteti po scenarijima od 2020. do 2030. godine ... 108
Slika 82. Instalirani kapaciteti po scenarijima od 2031. do 2040. godine ... 110
Slika 83. Instalirani kapaciteti po scenarijima od 2041. do 2050. godine ... 111
Slika 84. Usporedba proizvodnje po scenarijima iz fotonaponskih i vjetroelektrana za 2050., karakterističnu sušnu i vlažnu godinu ... 112
Slika 85. Promjena prosječnog faktora opterećenja za fotonaponske elektrane po scenarijima ... 113

Slika 86. Promjena prosječnog faktora opterećenja za vjetroelektrane po scenarijima 114
Slika 87. Instalirani alkalni elektrolizatori u svim scenarijima 115
Slika 88. Razlike odnosa instalacije kapaciteta spremnika vodika po scenarijima 116
Slika 89. Usporedba emisija CO_2 po scenarijima 116
Slika 90. Razlike odnosa obnovljivih izvora energije po scenarijima 117
Slika 91. Odnosi CEEP-a po scenarijima 118

POPIS TABLICA

Tablica 1. Potrebne ulazne datoteke za modeliranje sustava H2RES-u [27] 41
Tablica 2. Glavni parametri za definiranje sustava u H2RES-u [27] 43
Tablica 3. Parametri strategije za definiranje sustava u H2RES-u [27] 43
Tablica 4. Ostali parametri za definiranje sustava u H2RES-u [27] 44
Tablica 5. EV i V2G opći parametri za definiranje sustava u H2RES-u [27] 44
Tablica 6. Glavni parametri za model Republike Hrvatske 67
Tablica 7. Postotak (%) obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu Hrvatske do 2050. godine prema energetskoj strategiji 67
Tablica 8. Cijene emisijskih jedinica do 2050. godine 68
Tablica 9. Parametri simulacije za model Republike Hrvatske 68
Tablica 10. Ostali parametri za model Republike Hrvatske 69
Tablica 11. EV i V2G opći parametri za model Republike Hrvatske 70
Tablica 12. Podaci o proizvodnim kapacitetima za Republiku Hrvatsku 71
Tablica 13. Instalirani proizvodni kapaciteti u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena 86
Tablica 14. Ukupni instalirani kapaciteti za toplinske potrebe u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena 89
Tablica 15. Ukupni instalirani kapaciteti u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena 90
Tablica 16. Instalirani proizvodni kapaciteti u scenariju očekivanog razvoja 93
Tablica 17. Ukupni instalirani kapaciteti za toplinske potrebe u scenariju očekivanog razvoja 96
Tablica 18. Ukupni instalirani kapaciteti u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije u scenariju očekivanog razvoja 97
Tablica 19. Instalirani proizvodni kapaciteti u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta 100
Tablica 20. Ukupni instalirani kapaciteti za toplinske potrebe u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta 102
Tablica 21. Ukupni instalirani kapaciteti u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta 103
Tablica 22. Usporedba instaliranih kapaciteta po scenarijima 107

POPIS KRATICA

EU	Europska unija
NECP	Nacionalni energetski i klimatski plan
OIE	obnovljivi izvori energije
VOIE	varijabilni obnovljivi izvori energije
PV	fotonaponske elektrane, engl. „photovoltaic“
OTEC	pretvorba toplinske energije oceana, engl. Ocean thermal energy conversion“
EV	električna vozila, engl. „electric vehicles“
P2H	pretvorba električne energije u toplinsku, engl. „power-to-heat“
P2H2	pretvorba električne energije u vodik, engl. „power-to-hydrogen“
V1G	jednosmjerno pametno punjenje, engl. „unidirectional smart charging“
V2G	vozilo na mrežu, engl. „vehicle-to.grid“
V2H	vozilo na kućanstvo, engl. „vehicle-to-home“
V2X	vozilo na sve, engl. „vehicle-to-everything“
IKT	informacijsko komunikacijsko tehnološka
CEEP	višak proizvodnje električne energije, engl. „critical excess electricity production“
CSV	vrijednosti odvojene zarezom, engl. „comma-separated values“
CHP	kogeneracija, engl. „combined heat and power“
COP	toplinski množitelj, engl. „coefficient of performance“
CTS	centralizirani toplinski sustav
ATW	zrak-voda, engl. „air-to-water“
ATA	zrak-zrak, engl. „air-to-air“
PTV	potrošna topla voda
NASA	Nacionalni Aeronautička i Svemirska Administracija, engl. „National Aeronautics and Space Administration“
POWER	Predviđanje Svjetskih energetskih Resursa, engl. „Prediction of Worldwide Energy Resource“
RegCM	regionalni klimatski model, engl. „Regional Climate Model“

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
CO_2	-	ugljikov dioksid
CO_2e	-	emisije ekvivalentne emisijama ugljikovog dioksid
$Q_{t,i}$	MWh	Satno toplinsko opterećenje
Q_{god}	MWh	Ukupna godišnja potražnja energije
SS	°C	stupanj-sat
$T_{projektna}$	°C	Projektna temperatura
$T_{vanjska}$	°C	Vanjska temperatura
Q_c	MWh	Satno rashladno opterećenje
Q_{c_god}	MWh	Ukupna godišnja potražnja za hlađenjem
SS_c	°C	Stupanj sat

SAŽETAK

U skladu s ciljem smanjenja emisija CO_2 od 55% do 2030. godine u odnosu na vrijednosti iz 1990. te postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine, budući energetski sustavi oslanjat će se na obnovljive izvore energije. U takvim sustavima neophodne će biti tehnologije fleksibilnosti sustava kako bi se osigurala zadovoljavajuća potrošnja i sigurna opskrba u uvjetima promjenjive proizvodnje i trenucima kada ona nije dostupna.

Sukladno navedenom, zadatak energetskog planiranja iziskuje posebnu pozornost usmjerenu na modeliranje sustava koji će zadovoljiti ciljeve energetske tranzicije i osigurati stabilan rad, a sve postizanjem što nižih troškova sustava. Stoga se u ovom radu koristi računalni model za dugoročno energetsko planiranje, H2RES, razvijen na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu unutar INTERENERGY projekta. Program ima mogućnost modeliranja fleksibilnih tehnologija i promjene dostupnosti resursa tijekom godina, što predstavlja bitan element u razvoju sustava u skladu s promjenom klimatskih uvjeta u budućnosti. Proučit će se različiti scenariji promjene klimatskih parametra za Republiku Hrvatsku, koji posljedično utječu na proizvodnju iz obnovljivih izvora energije te usporediti ponašanje sustava u scenarijima različite dostupnosti uz poštivanje ciljeva energetske nezavisnosti o fosilnim gorivima te željene klimatske neutralnosti Europe do 2050. godine. Simulacije se provode za svaku godinu u promatranom razdoblju, što je odmak od uobičajenih alata otvorenog koda i time se mogućnostima približava komercijalno dostupnim alatima.

Ključne riječi: H2RES, Obnovljivi izvori energije, Energetsko planiranje, Klimatske promjene

SUMMARY

In accordance with the goal of reducing CO_2 emissions by 55% until 2030 compared to 1990 values and achieving climate neutrality by 2050, future energy systems will rely on renewable energy sources. In such systems, demand-side flexibility technologies will be necessary to ensure required consumption and safe supply in conditions of variable production and times when it is not available.

Accordingly, the task of energy planning requires special attention focused on modeling the system that will meet the goals of the energy transition and ensure stable operation, all while achieving the lowest possible system costs. Therefore, this paper uses a computer software for long-term energy planning, H2RES, developed at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb within the INTERENERGY project. The program has the ability to model flexible technologies and changes in the availability of renewable resources over the years, which is an essential element in the development of the system in accordance with changing climate conditions in the future. Different scenarios of climate parameter changes for Republic of Croatia, which consequently affect the production from renewable energy sources, will be studied and the behavior of the system will be compared in scenarios of different availability while respecting the goals of energy independence from fossil fuels and the desired climate neutrality of Europe by 2050. Simulations are carried out for each year in the observed period, which is a departure from the usual open source tools and therefore it approaches the capabilities of commercially available tools.

Key words: H2RES, Renewable energy sources, Energy planning, Climate change

1. UVOD

Usvajanje Pariškog sporazuma, 12. prosinca 2015. godine, predstavlja prekretnicu i početak multilateralnog procesa borbe protiv klimatskih promjena. Sporazum je pravno obvezujući međunarodni ugovor, usvojen od 196 svjetskih čelnika, a stupio je na snagu 5. studenog 2016. godine s ciljem zadržavanja porasta prosječne svjetske temperature na razini znatno manjoj od 2°C u usporedbi s predindustrijskim razinama uz dodatne napore da se taj porast ograniči i na 1,5°C [1].

Sve zemlje članice Europske unije (EU) ratificirale su Pariški sporazum, a Europska unija kao odgovor na borbu protiv klimatskih promjena i postavljenog cilja klimatske neutralnosti Europe do 2050. godine, iznijela je ključne ciljeve energetske strategije do 2030. godine [2]:

- smanjenje emisija stakleničkih plinova za najmanje 55% u usporedbi s razinama iz 1990;
- povećanje udjela obnovljive energije u potrošnji energije na 32%;
- poboljšanje energetske učinkovitosti za 32,5% i
- međusobna povezanost energetskih sustava EU-a od barem 15%.



Slika 1. Ključni ciljevi energetske strategije EU do 2030. [2]

Države članice EU-a dužne su izvještavati o svom doprinosu zajedničkim ciljevima europske energetske strategije. Svaka država, pa tako i Hrvatska, donosi Nacionalni energetski i klimatski plan (NECP) koji obuhvaća desetogodišnje razdoblje, a prvi takav je donesen za razdoblje od 2021. do 2030. [2].



Slika 2. Vremenski okvir razvoja NECP-a država članica [2]

U skladu s energetskom unijom, pet glavnih ciljeva energetske politike EU-a su [3]:

- diversificirati europske izvore energije, osigurati energetsku sigurnost s pomoću solidarnosti i suradnje među državama članicama EU-a;
- zajamčiti funkcioniranje potpuno integriranog unutarnjeg energetskog tržišta, omogućujući slobodan protok energije kroz EU putem odgovarajuće infrastrukture i bez tehničkih ili regulatornih prepreka;
- poboljšati energetsku učinkovitost i smanjiti ovisnost o uvozu energije, smanjiti emisije te poticati zapošljavanje i rast;
- dekarbonizirati gospodarstvo i prijeći na niskougljično gospodarstvo u skladu s Pariškim sporazumom;
- promicati istraživanje u području tehnologija niskougljične i čiste energije, u energetskoj tranziciji davati prednost istraživanju i inovacijama te poboljšati konkurentnost.

Strategijom Energetske unije Europi i njezinim građanima i građankama nastoji se osigurati cjenovno pristupačna, sigurna i održiva energija. U Integriranom energetskom i klimatskom planu posebnu pozornost treba posvetiti ciljevima do 2030. godine, koji uključuju smanjenje emisija stakleničkih plinova, porast energije iz obnovljivih izvora, energetske učinkovitosti i

elektroenergetske međusobne povezanosti. Treba osigurati da je Integrirani energetski i klimatski plan u skladu te da doprinosi ciljevima održivog razvoja [4].



Slika 3. Pet stupova strategije Energetske unije [2]

Sukladno, Hrvatski sabor na prijedlog Vlade Republike Hrvatske donosi Strategiju energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine, s pogledom na 2050. godinu, koja predstavlja korak prema ostvarenju vizije niskougljičnog razvoja te osigurava prijelaz na novo razdoblje energetske politike kojom se osigurava pristupačna, sigurna i kvalitetna opskrba energijom. Strategija predstavlja širok spektar inicijativa energetske politike, kojima će se ojačati sigurnost opskrbe energijom, postupno smanjiti gubici energije i povećavati energetska učinkovitost, smanjivati ovisnost o fosilnim gorivima, povećati domaća proizvodnja i korištenje obnovljivih izvora energije [5].

Izrada energetskih strategija i planiranje energetskih sustava zadatak je koji zahtjeva upotrebu različitih metoda, konstantnu implementaciju novih rješenja te učestalo ažuriranje u skladu s razvojem novih tehnologija i promjenom okolnosti bitnih za energetski sustav. Mnogi radovi se bave upravo tom problematikom, pa su tako u [6] prikazani koraci za prijelaz na dekarbonizirani sustav 100% obnovljive energije za jugoistočnu Europu do 2050. godine. U radu je korišten računalni model EnergyPLAN, alat za energetsko planiranje energetskih sustava provodeći tehničke i ekonomske analize pomoću kojeg su se do sada provele brojne analize različitih nacionalnih energetskih sustava. Softver za energetsko planiranje PLEXOS koristio se u [7] kako bi se proučio utjecaj uključivanja fleksibilnih zahtjeva u dugoročnim modelima energetskih sustava u slučaju visoke penetracije obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije. U [8] je proučen utjecaj vremenskih uvjeta na europsku proizvodnju i potražnju energije iz obnovljivih izvora, u [9] je isto istraženo na primjeru

Ujedinjenog Kraljevstva, u [10] na primjeru jugoistoka Sjedinjenih Američkih Država, a u [11] je istražen model predviđanja proizvodnje fotonaponskih elektrana (PV) u različitim vremenskim uvjetima. U [12] se napravila usporedba modela energetske tranzicije u dva alata za energetsko planiranje, PLEXOS i H2RES.

Budući energetski sustavi, temeljeni na obnovljivim izvorima energije, zahtijevaju posebnu pozornost prilikom planiranja i ulaganja u nove tehnologije. Proizvodnja električne energije iz varijabilnih izvora energije (VOIE), primjerice sunca i vjetra, uvelike ovisi o trenutnoj dostupnosti odnosno meteorološkim uvjetima koji se mogu razlikovati na godišnjoj razini, ali i pod utjecajem dugoročnih promjena uzrokovanih klimatskim promjenama. Stoga je izrazito važno razmotriti utjecaj mogućih oscilacija dostupnosti resursa prilikom planiranja energetskih sustava, i u skladu s tim, pronaći optimalnu konfiguraciju kako bi se osigurala dostatna proizvodnja i sigurna opskrba. Većina alata za energetsko planiranje ne razmatra utjecaj dostupnosti resursa, stoga je svrha ovog rada upravo analizirati potencijal varijabilnih obnovljivih izvora energije, različitim scenarijima u odnosu na vremenske uvjete, u računalnom programu za energetsko planiranje koji to uzima u obzir – H2RES [13].

2. PREGLED TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE ENERGIJE IZ OIE

U nastavku je dan pregled i kratak opis tehnologija proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. Glavna karakteristika obnovljivih izvora energije je da su neiscrpni, odnosno neprestano se obnavljaju u prirodi.

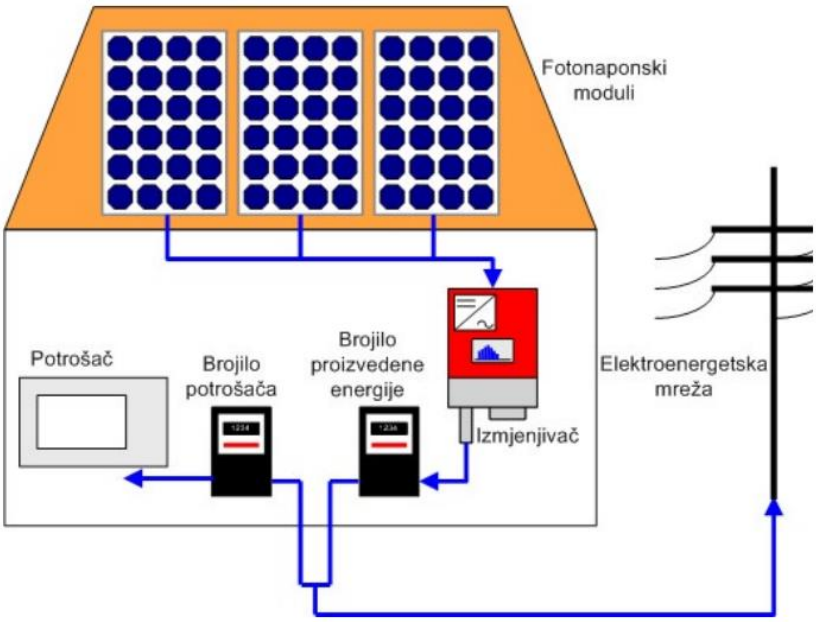
2.1. Energija sunca

Stopa emisije energije iz sunca je $3,8 \times 10^{23}$ kW. Od ukupnog, samo mali dio, otprilike $1,7 \times 10^{14}$ kW, presreće Zemlja koja se nalazi oko 150 milijuna km od sunca. Od toga, 30% se reflektira u svemir, 47% se pretvara u niskotemperaturnu toplinu i ponovno zrači u svemir, a 23% pokreće ciklus isparavanja/oborina u biosferi. Manje od 0,5% zastupljeno je u kinetičkoj energiji vjetra i valova te u fotosintetskom skladištenju u biljkama. Ukupno zračenje na površinu Zemlje je samo oko jedne trećine ukupnog zračenja tijekom a godine, a 70% od toga otpada na oceane. Međutim, preostalih $1,5 \times 10^{17}$ kWh koji se odnose na kopno je ogromna količina energije koja se može iskoristiti uz fizička i društveno-ekonomska ograničenja [14].

Sunčevo zračenje varira regionalno, s promjenom godišnjih doba te satno u skladu s dnevnim varijacijama položaja sunca. Mnogi lokaliteti nemaju neprekinuto osunčanje, a naoblaka može značajno smanjiti ukupno zračenje i uzrokovati relativno brze varijacije u intenzitetu, u nekim slučajevima značajne varijacije iz minute u minutu ili čak tijekom sekundi, što utječe na satnu dostupnost koja se razmatra prilikom energetskog planiranja [15]. Za grubu procjenu prosječne snage Sunčeva zračenja na površini zemlje tijekom cijele godine, može se uzeti vrijednost od skoro 200 W/m^2 [16].

2.1.1. Fotonaponski sustav

Fotonaponski sustavi koriste energiju sunčevog zračenja za proizvodnju električne energije. Mogu biti sustavi spojeni na elektroenergetsku mrežu ili autonomni sustavi. Osnovni element fotonaponskog sustava je fotonaponski modul. Fotonaponski modul sastoji se od niza serijski spojenih ćelija, čiji broj varira ovisno o snazi i željenim električnim karakteristikama modula. Izlaganjem ćelije sunčevom zračenju generira se električna struja te time ćelija postaje izvor električne energije. Ćelije se proizvode u tehnologijama amorfnog, monokristaličnog, multikristaličnog ili trakastog kristaličnog silicija te u tehnologiji tankog filma [17].

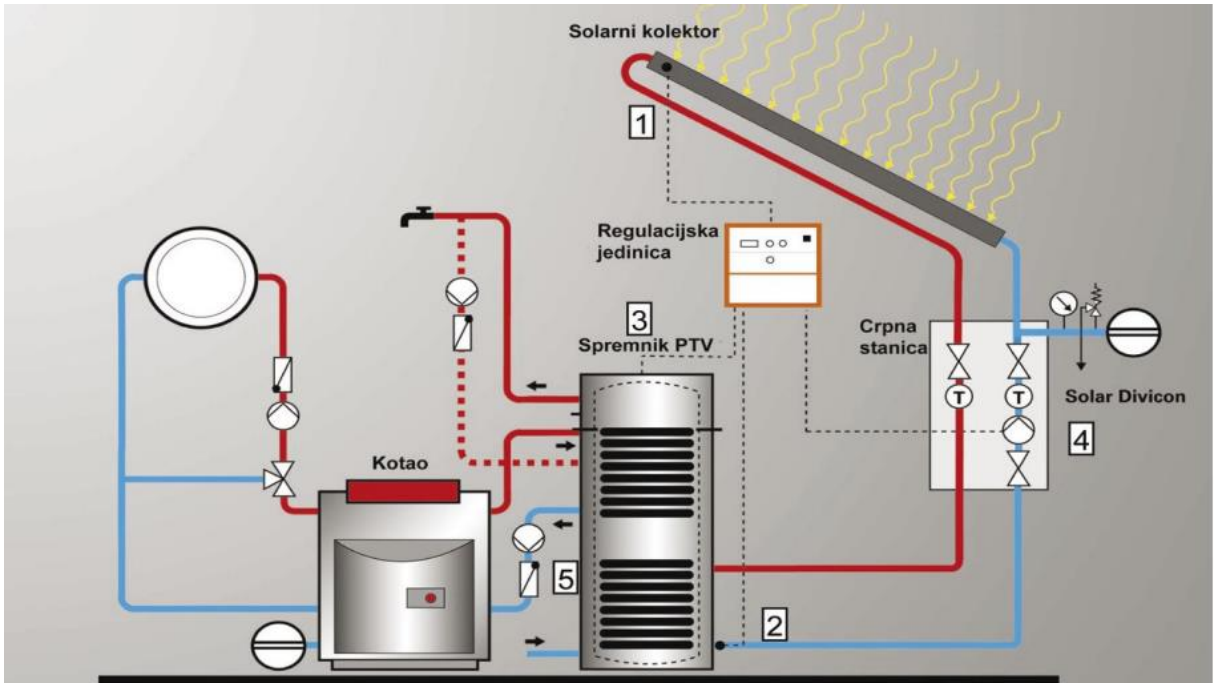


Slika 4. Shematski prikaz fotonaponskog sustava spojenog na elektroenergetsku mrežu [17]

Osnovna zadaća mrežno vezanih fotonaponskih sustava, Slika 4., je predaja proizvedene električne energije u električnu mrežu. Fotonaponski moduli proizvode se u relativno malim snagama (do nekoliko stotina vata). Za postizanje većih napona moduli se serijski spajaju u nizove, a za postizanje većih snaga nizovi se paralelno spajaju u fotonaponsko polje željene snage. Fotonaponski moduli generiraju istosmjernu električnu struju te se za pretvorbu iz istosmjerne u izmjeničnu, pogodnu za predaju u elektroenergetsku mrežu, koriste izmjenjivači [17].

2.1.2. Sunčevi toplinski sustav

Sunčevi toplinski sustavi koriste se za zagrijavanje potrošne tople vode te kao podrška grijanju prostora. Osnovni element sunčevog toplinskog sustava je kolektor. Sunčevi se kolektori najčešće postavljaju na krovove objekata, a nešto rjeđe na fasade. Najčešće korišteni tipovi kolektora su pločasti i vakuumski kolektori. Osim sunčevih kolektora, sunčevi se toplinski sustavi sastoje od cijelog niza elemenata: spremnika potrošne tople vode, kotla, crpke te popratne opreme poput sustava regulacije, sigurnosnih ventila itd. [17].



Slika 5. Sunčev toplinski sustav [17]

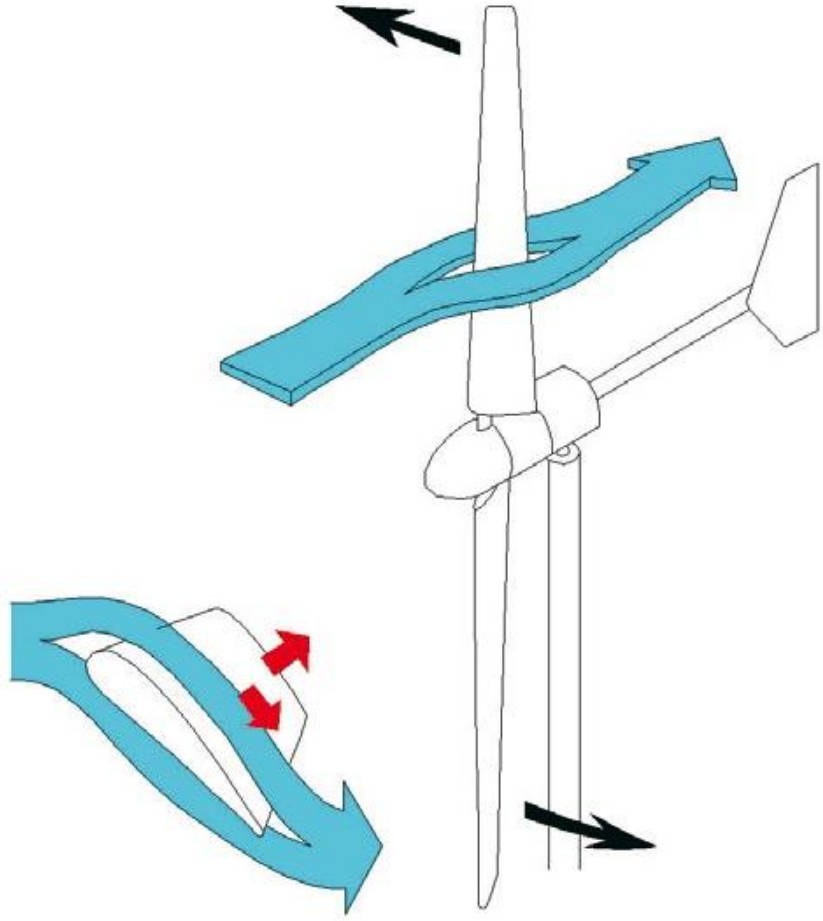
Slika 5. prikazuje sunčevi kolektor koji se sastoji se od apsorbera unutar kojega je položen niz paralelno spojenih bakrenih cjevčica. Apsorber je s gornje strane premazan selektivnim premazom koje osigurava visoki stupanj propusnosti za sunčevo zračenje, te nizak stupanj emisivnosti za kratkovalno zračenje. Dobra izolacija između stijenke kućišta i apsorbera nužna je za učinkovitost kolektora. Apsorber u principu služi kao izmjenjivač topline – s jedne strane apsorbira energiju sunčevog zračenja, a s druge strane tu toplinu predaje radnom fluidu, koji se dalje vodi u spremnik potrošne tople vode [17].

Budući da se vremenski profil potreba za toplom vodom i dostupnim resursom Sunčevog zračenja ne poklapaju, topla voda se neprestano zagrijava preko radnog fluida, te se tako zagrijana topla voda nalazi u spremniku potrošne tople vode. Na taj način, potrošna topla voda iz sustava raspoloživa je i u razdobljima kada nema osunčanja, npr. u noćnim satima. Spremnici tople vode izvedeni su tako da se u što je moguće većoj mjeri smanje toplinski gubitci te omoguće temperaturnu slojevitost vode unutar spremnika. Osim kolektora, u ovakvim sustavima gotovo uvijek je potrebno koristiti i dodatni energent za zadovoljavanje energetskih potreba, naročito ako se radi i o podršci grijanju prostora [17].

2.2. Energija vjetra

Vjetrovi su posljedica gibanja zračnih masa u atmosferi. Ova gibanja zraka nastaju na globalnoj razini prvenstveno zbog diferencijalnog sunčevog zagrijavanja Zemljine atmosfere. Stoga je energija vjetra neizravni oblik sunčeve energije. Zrak u ekvatorijalnim područjima zagrijava se jače nego na drugim geografskim širinama, zbog čega postaje lakši i rjeđi. Taj topli zrak diže se na velike visine, a zatim struji sjeverno i južno prema polovima gdje je zrak uz površinu hladniji. Gibanja prestaju na oko 30°S i 30°J, gdje se zrak počinje hladiti i tonuti te se zatim povratni tok tog hladnijeg zraka kreće u najnižim slojevima atmosfere [15].

Energija vjetra je prirodni resurs koji je moguće iskoristiti za proizvodnju mehaničkog rada, odnosno električne energije. Uređaj pomoću kojeg se kinetička energija sadržana u vjetru najprije pretvara u mehaničku energiju, a potom u električnu energiju, naziva se vjetroagregat. Svaki se vjetroagregat sastoji od dva osnovna dijela: rotor vjetroagregata i električni generator. Današnji vjetroagregati su moderni i složeni uređaji koji se osim spomenutih dijelova sastoje još od niza sofisticiranih dijelova. Većina modernih vjetroagregata ima rotor s horizontalnom osi vrtnje i tri lopatice. Vjetroagregati su uređaji konstruirani tako da kinetičku energiju oduzimaju vjetru i pretvaraju je prvo u mehaničku energiju vrtnje, a potom u električnu u generatoru. Pretvaranje kinetičke energije gibanja vjetra u mehaničku energiju vrtnje ostvaruje se korištenjem turbinskog kola. Turbinsko kolo se uobičajeno sastoji od tri lopatice koje su aerodinamički profilirane i na njima se slično kao kod zrakoplovnog krila stvaraju sile uzgona i otpora. Zbog tipičnog zakrivljenja, zrak koji struji s gornje strane mora prijeći veću udaljenost u istom vremenu nego zrak koji prolazi s donje strane. Zbog toga, čestice zraka na gornjoj površini imaju veću brzinu, što će dovesti do pada tlaka na gornjem dijelu profila lopatice. Razlika tlakova će uzrokovati silu na lopaticu F. Komponenta sile koja je okomita na neporemećenu struju vjetra naziva se uzgon F_u , a sila u pravcu puhanja vjetra otpor F_o kao što prikazuje Slika 6. [17].



Slika 6. Sile uzgona – F_u i otpora - F_o na profile lopatica vjetroagregata [17]

Općenito postoje dva tipa vjetroelektrana: s okomitim i s vodoravnim rotorom. Vjetroelektrane s okomitim rotorom se rjeđe koriste. S obzirom na mjesto postavljanja vjetroelektrane se dijele na one koje se postavljaju na kopnu i one na morskoj pučini [16].

Brzina vjetra na određenoj lokaciji kontinuirano varira. Godišnja srednja brzina vjetra razlikuje se iz godine u godinu (godišnje), mijenja se s godišnjim dobima (sezonski), s trenutnim vremenskim prilikama (sinoptički), na dnevnoj bazi (dnevno) i od sekunde do sekunde (turbulencije). Sve te promjene, u različitim vremenskim razmacima, mogu biti problematične u predviđanju ukupno dostupne energije na lokaciji (godišnje i sezonske) te u osiguravanju da promjenjivost proizvodnje energije ne šteti lokalnoj elektroenergetskoj mreži na koju je vjetroturbina povezana [15].

2.3. Hidroenergija

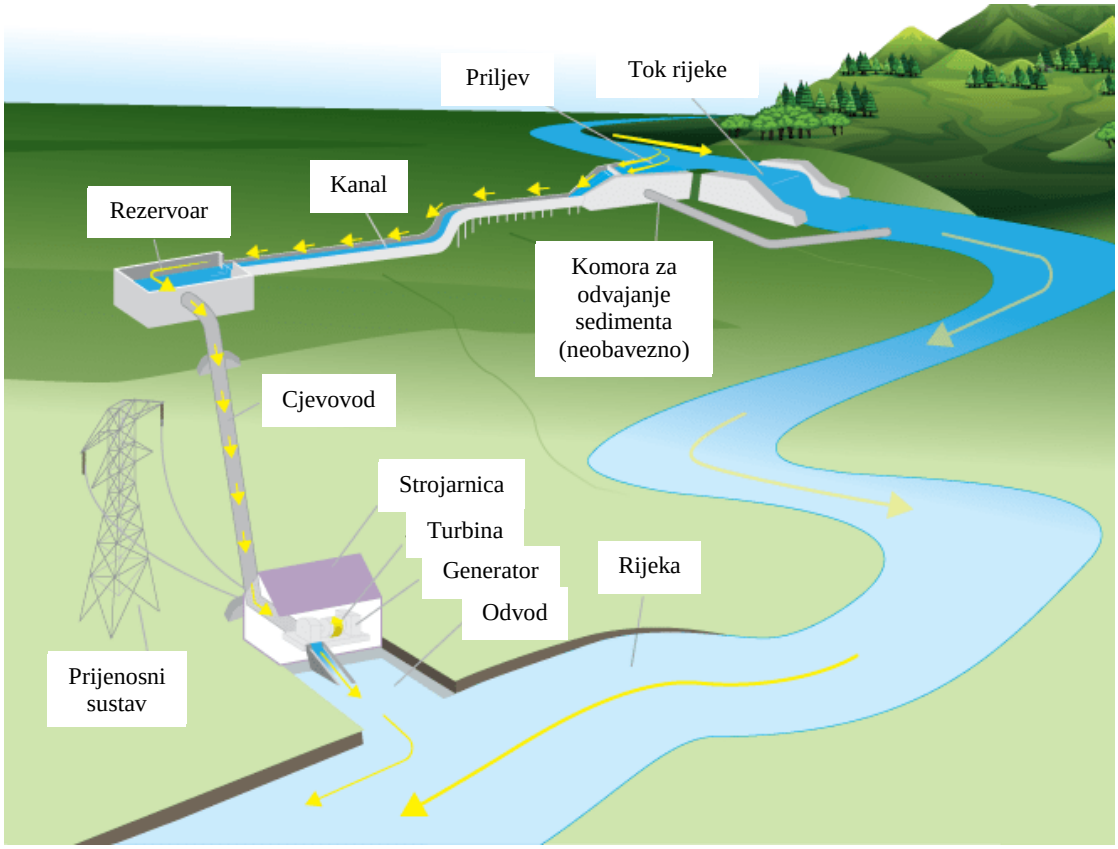
Proizvodnja električne energije iz hidroelektrana je neizravni oblik sunčeve energije. Sunčevo zračenje isparava vodu iz mora, u manjoj mjeri i s kopnenih područja, te se zagrijana vodena para diže, a kako se uzdiže, širi se i hladi te na kraju kondenzira u obliku oblaka. Dio nastalih oborina pada na povišen teren. Na taj način pridobije potencijalnu energiju kao rezultat sunčevog djelovanja. Hidroenergija je rezultat iskorištavanja te energije dok voda teče natrag prema vodenim rezervoarima [15].

Količina vode i iskoristiv pad određuju potencijal za korištenje energije položaja vode. Oborine i tlo (konfiguracija i sastav) određuju obje značajke. Za neku konkretnu lokaciju od značaja je poznavati vjerojatno trajanje određenog protoka vode i iskoristivi pad. Krivulja trajanja protoka nastaje iz mjerenja ili iz procjene, a samo dugotrajna mjerenja protoka mogu dati pouzdane podatke zbog velike varijabilnosti uslijed uobičajenih klimatskih varijacija. Poznavanjem ili procjenom trajanja protoka i iskoristivih padova moguće je procijeniti hidroenergetske resurse. Uobičajeno se hidroenergetski resursi dijele na ukupne (teorijske), tehničke i ekonomski iskoristive. Tehnički potencijal je nekoliko puta (oko 3x) manji od ukupnog i nešto veći (oko 30%) od ekonomskog. Konačnu iskoristivost određuju ekološki, ekonomski i društveni faktori [16].

Princip rada hidroelektrana temelji se na tri elementarne energetske transformacije. Postavljanjem brane odnosno preljevnog praga na određenom vodotoku dolazi do stvaranja visinske razlike razine vode na lokaciji ispred i iza brane. Ova visinska razlika predstavlja potencijalnu energiju određene količine vode. Ta potencijalna energija vode pretvara se u kinetičku energiju vode koja se dovodi vodnoj turbini kroz kanale odnosno cjevovode. Kinetička energija vode u pokretu se rotacijom turbine pretvara u mehaničku energiju. Mehanička energija rotirajuće turbine pretvara se u električnu energiju u generatoru s kojim je mehanički povezana osovinom. Proizvedena električna energija se koristi na istoj lokaciji gdje se nalazi hidroelektrana ili/i se dalekovodima prenosi do potrošača uz prethodnu transformaciju u transformatoru na višu razinu napona pogodnu za prijenos na veće udaljenosti [17].

Postoje četiri glavna tipa hidroenergetskih postrojenja. Te se tehnologije često mogu preklapati. Na primjer, akumulacijske izvedbe često mogu uključivati element crpljenja za nadopunu vode koja prirodno teče u akumulaciju uz korištenje električne energije, a protočne izvedbe mogu pružiti određenu mogućnost skladištenja [18]:

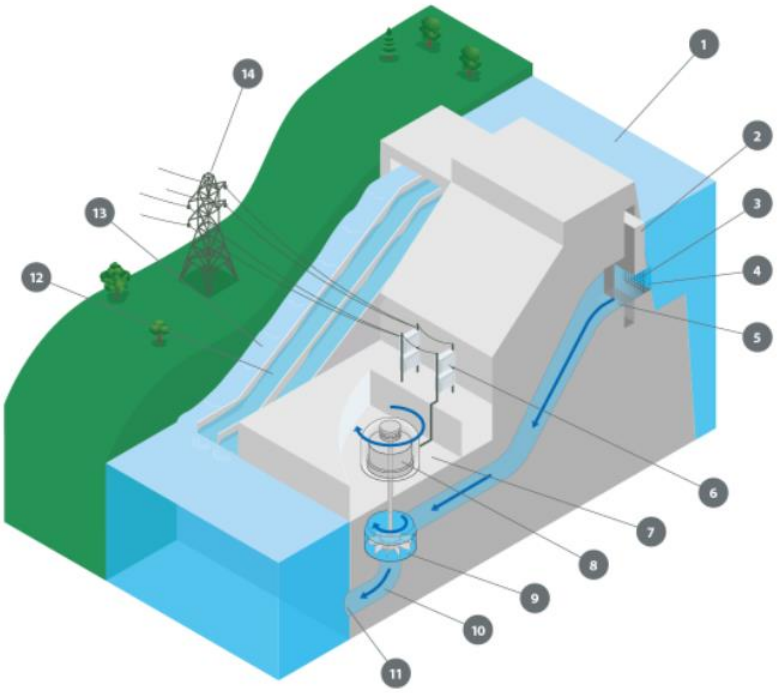
Protočne hidroelektrane: Postrojenje koje usmjerava tok vode iz rijeke kroz kanal ili cjevovod kao bi se pokrenula turbina. Protočna izvedba obično će imati malo ili nimalo skladišnih objekata. Ova izvedba osigurava kontinuiranu opskrbu električnom energijom (bazno opterećenje), uz određenu fleksibilnost rada za dnevne fluktuacije potražnje kroz protok vode koji je reguliran postrojenjem. Primjer protočne hidroelektrane prikazuje Slika 7.



Slika 7. Protočna hidroelektrana [19]

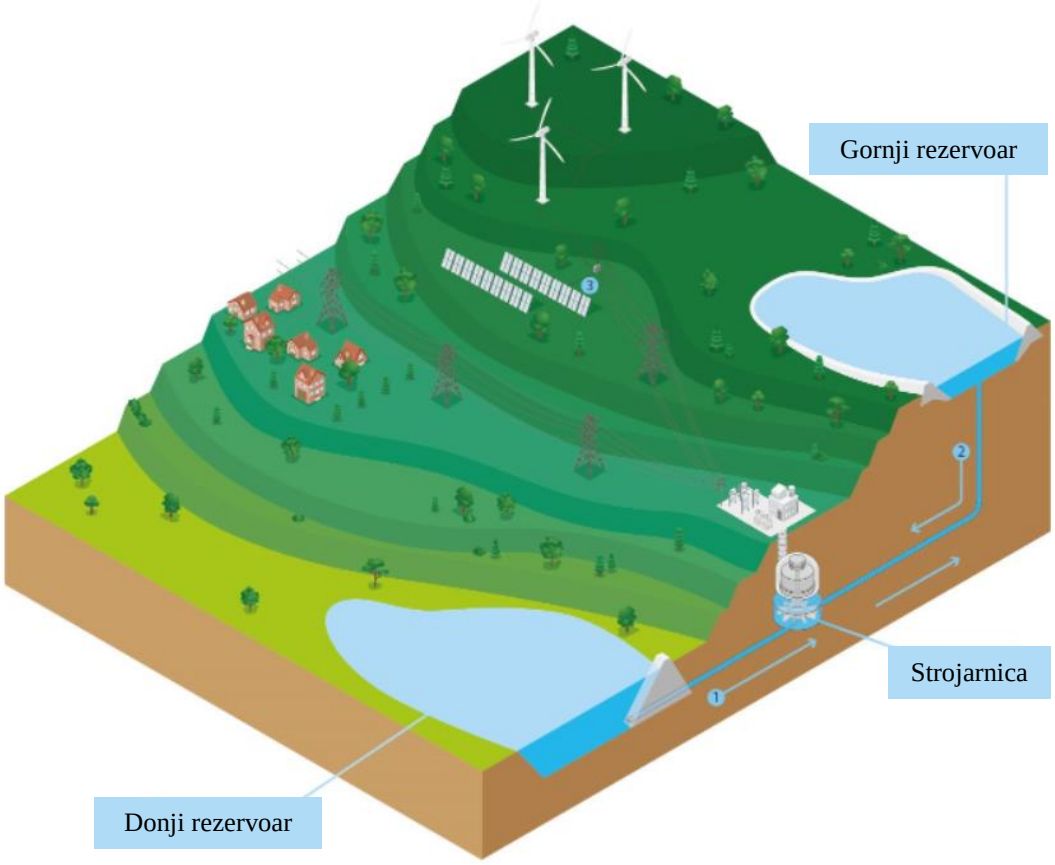
Akumulacijske hidroelektrane: obično veliki sustav koji koristi branu za skladištenje vode u rezervoaru, kao što prikazuje Slika 8. Električna energija se proizvodi ispuštanjem vode iz rezervoara kroz turbinu, koja aktivira generator. Akumulacijska hidroelektrana osigurava bazno opterećenje, kao i mogućnost gašenja i pokretanja u kratkom roku prema zahtjevima sustava (vršno opterećenje). Može ponuditi dovoljno skladišnog kapaciteta za rad neovisno o hidrološkom dotoku nekoliko tjedana ili čak mjeseci.

1. Rezervoar
2. Kontrolna soba
3. Rešetka
4. Priljev
5. Cjevovod
6. Transformator
7. Strojarnica
8. Generator
9. Turbina
10. Izlazna cijev
11. Odljev
12. Preljev brane
13. Prijelaz za ribe
14. Prijenosni sustav



Slika 8. Akumulacijska hidroelektrana s glavnim komponentama [19]

Crpne hidroelektrane: osiguravaju opskrbu vršnog opterećenja, iskorištavajući vodu koja kruži između donjeg i gornjeg rezervoara pomoću pumpi koje koriste višak energije iz sustava u vrijeme male potražnje. Kada je potražnja za električnom energijom velika, voda se pušta natrag u donji rezervoar kroz turbine za proizvodnju električne energije. Ovakve hidroelektrane, Slika 9., su većinom akumulacijskog tipa.



Slika 9. Crpna hidroelektrana [19]

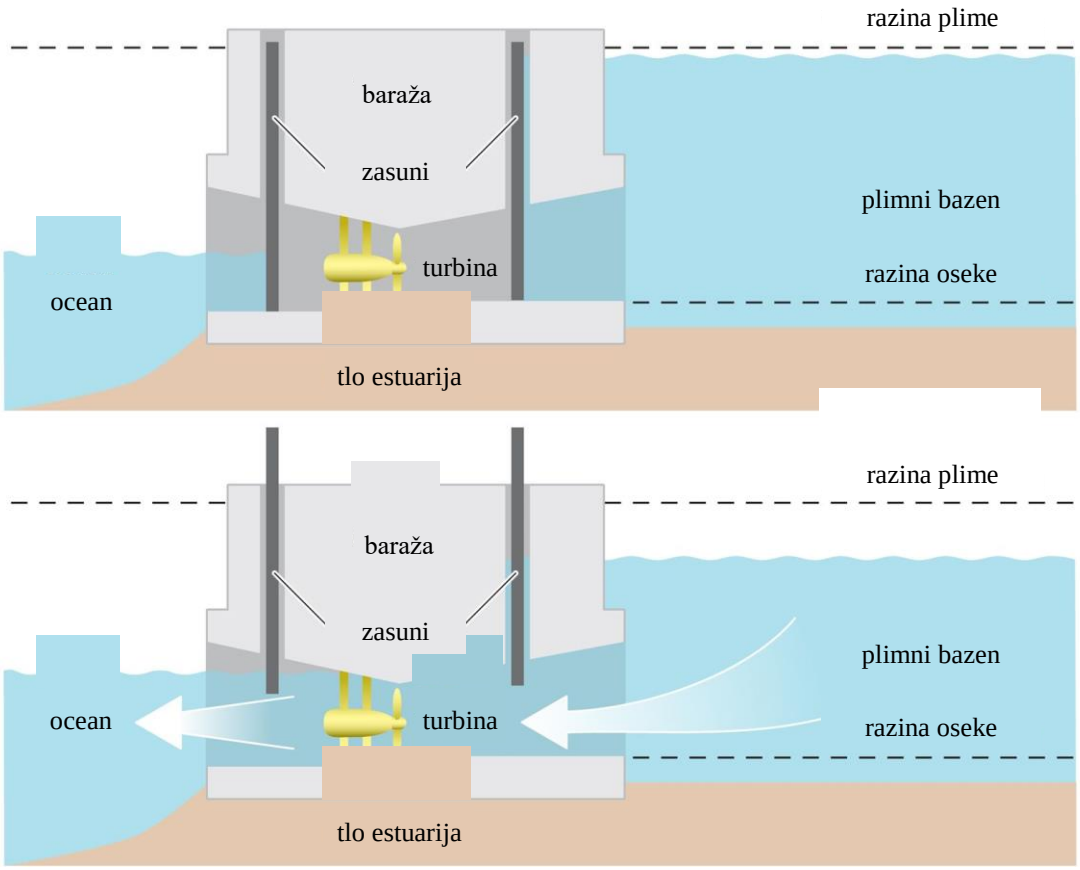
Odobalne hidroelektrane: manje uspostavljena, ali rastuća skupina tehnologija koje koriste plimne struje ili snagu valova za proizvodnju električne energije iz morske vode (detaljnije opisane u narednim poglavljima).

2.4. Energija plime i oseke

Mjesečeva i Sunčeva gravitacijska polja uzrokuju prirodni porast i pad priobalnih plimnih voda. Budući da je Mjesec bliži Zemlji, iako manje masivan, ima dominantan učinak na plimu i oseku. Kako mjesec ima 2,2 puta veći utjecaj od Sunca, moglo bi se smatrati da je energija plime i oseke uglavnom oblik lunarne energije. Zemlja se okrene oko svoje osi jednom svaka 24 sata, a u referentnom okviru Zemlje, Sunce okruži Zemlju jednom u 24 sata. Mjesec okruži Zemlju otprilike svakih 29 dana, a prema Zemljinom referentnom okviru, čini se da Mjesec okruži Zemlju jednom u 24 sati i 50 minuta. Ova razlika u periodima između prividnih putanja Sunca i Mjeseca dovodi do promjena faza s većim proljetnim plimama tijekom usklađenog ponašanja i manjim slabijim plimama kada Sunce i Mjesec nisu usklađeni [15].

Koriste se dvije vrste tehnologija za iskorištavanje energije iz plime i oseke. Prva se temelji na hvatanju energije plime i oseke kao potencijalne energije unutar spremnika. Druga se temelji na izravnoj ekstrakciji kinetičke energije plimnih struja [20].

Plimne brane: U svom najosnovnijem obliku, tehnologija plime i oseke je jednostavna: rastuća poplavna plima ulazi u bazen kroz ulazne otvore ili zasune i unatrag kroz turbine u praznom hodu. Tijekom plime, svi otvori su zatvoreni sve dok plima dovoljno ne oslabi kako bi se razvila korisna visina preko baraže. Turbine se tada otvaraju i proizvode električnu energiju nekoliko sati, sve dok razlika razina između bazena za pražnjenje i sljedeće plime ne padne na minimum na kojem turbine mogu raditi. Ubrzo nakon toga, razina plime i razina bazena će biti jednaka, otvori se otvaraju i ciklus se ponavlja [20]. Princip prikazuje Slika 10.



Slika 10. Princip rada plimne brane [21]

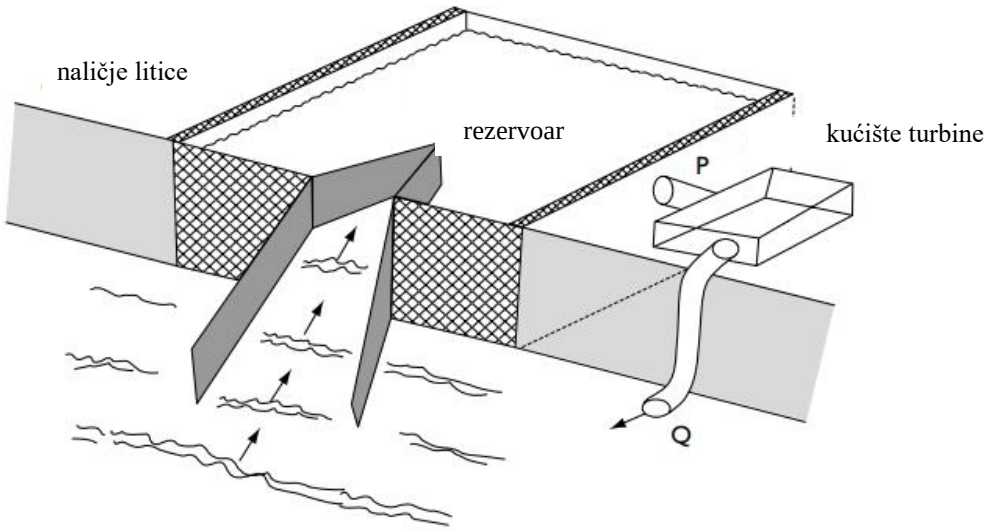
Plimni tokovi: Tehnologija plimnog toka izvlači energiju izravno iz struja koje teku na određenim lokacijama, potaknutim porastom i padom plime i oseke u blizini. Ove struje obično imaju male brzine (1 m/s), iako se mogu poboljšati lokalnom topografijom. Konkretno, brzina se može uvelike povećati u tjesnacima između otoka ili između otoka i kopna. Plime se mogu predvidjeti s vrlo velikom točnošću te nakon mjerenja na lokaciji, pouzdano se može predvidjeti energija dostupna za pretvorbu [15].

2.5. Energija valova

Prolaz vjetra preko površine mora rezultira postupnim prijenosom energije u vodu generirajući valove, tako da je energija valova također neizravan oblik sunčeve energije. Podaci o valovima pokazuju da se visine i razdoblja oceanskih valova kontinuirano mijenjaju kroz vrijeme, što rezultira s gotovo kontinuiranom varijacijom snage valova. Pretvorba snage valova u električnu zahtijeva postrojenje koje presreće valove i pretvara dio energije najprije u mehanički, a zatim u električni oblik. Pretvorba energije valova u mehaničku energiju zahtijeva središnju stabilnu strukturu koja uključuje aktivni element koji se pomiče u odnosu na sile valova i može reagirati na središnju strukturu kako bi proizveo sile i pomake koji generiraju mehaničku snagu [15].

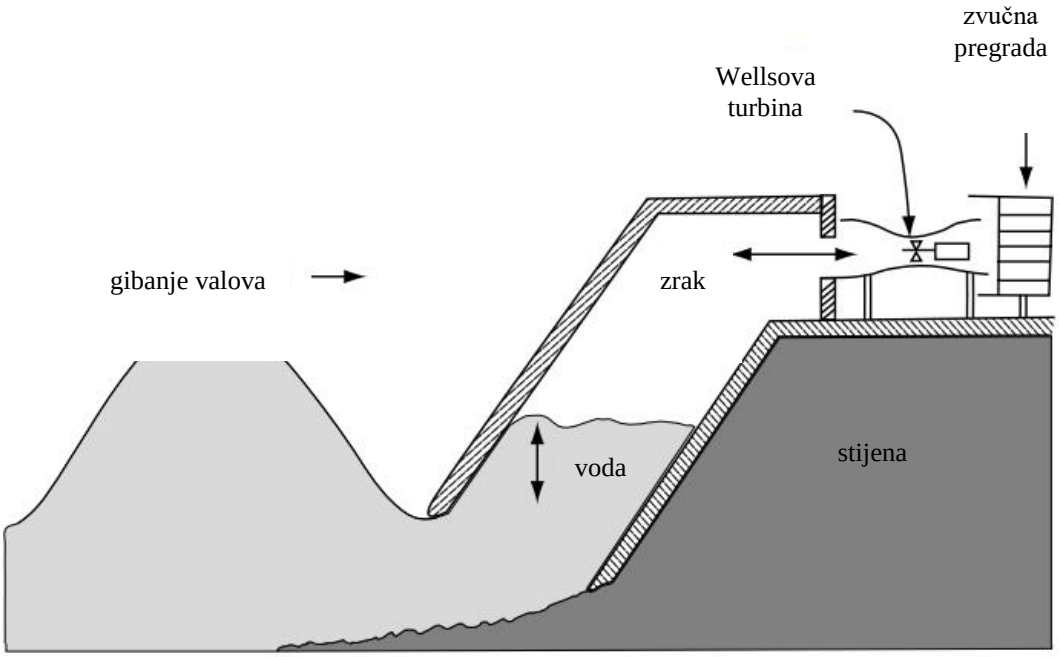
Kako val prelazi stacionarni položaj površina mijenja visinu, voda blizu površine se pomiče kako mijenja kinetičku i potencijalnu energiju, a mijenja se i tlak ispod površine. Osmišljen je veliki izbor postrojenja za izvlačenje energije korištenjem jedne ili više ovih pojava kao koncept postrojenja [22]. Nekoliko njih opisano je u nastavku:

Sustavi za hvatanje valova: ove izvedbe su vjerojatno konceptualno najjednostavnije. Razvijaju se iz fenomena koji se često opaža u prirodnim lagunama. Valovi se lome nad morskim zidom (ekvivalent prirodnom grebenu) i voda se zarobi na visini iznad srednje razine mora. Ta voda se tada može vratiti u more kroz konvencionalni hidroelektrični niskotlačni generator [22]. Primjer ovakve izvedbe prikazuje Slika 11.



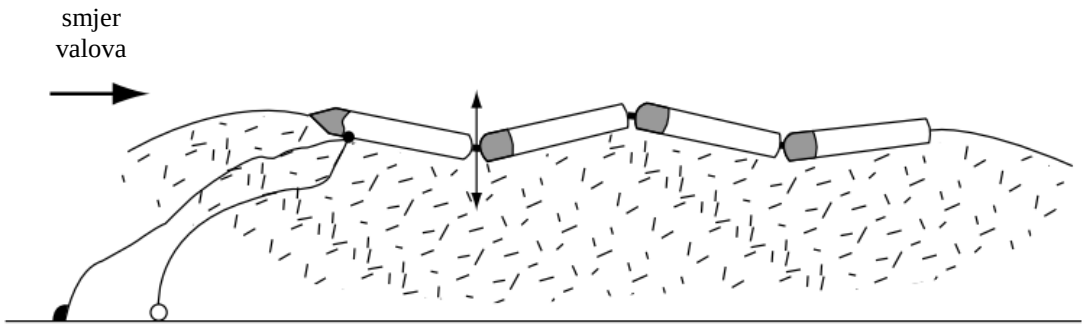
Slika 11. Shematski prikaz Tapchan sustava za hvatanje valova izgrađen u Norveškoj [22]

Oscilirajući vodeni stupac (OWC): Kada val naiđe na djelomično potopljeni otvor u vodi, stupac vode oscilira gore-dolje u šupljini. To može izazvati oscilatorno gibanje zraka iznad stupca, koji može biti povezan s atmosferom preko zračne turbine. Električna energija obično se dobiva iz oscilirajuće struje zraka pomoću Wellsove turbine. Takve turbine se, nakon pokretanja, okreću u istom smjeru kao i zrak kako bi izvukle energiju iz zraka koji struji u bilo kojem aksijalnom smjeru, tj. gibanje turbine je neovisno o smjeru fluida [22]. Slika 12. prikazuje jednu od mogućih izvedbi uređaja za hvatanje energije valova upotrebom oscilirajućeg vodenog stupca.



Slika 12. Shematski prikaz uređaja za hvatanje energije valova upotrebom oscilirajućeg vodenog stupca [22]

Postrojenja valnog profila: Ova izvedba postrojenja, koju shematski prikazuje Slika 13., pluta na površini mora ili blizu nje i kreće se u skladu s oblikom vala, a ne samo u odnosu na vertikalni pomak vode. Potrebne su posebne konstrukcije za takvo izvlačenje korisne snage iz gibanja valova [22].

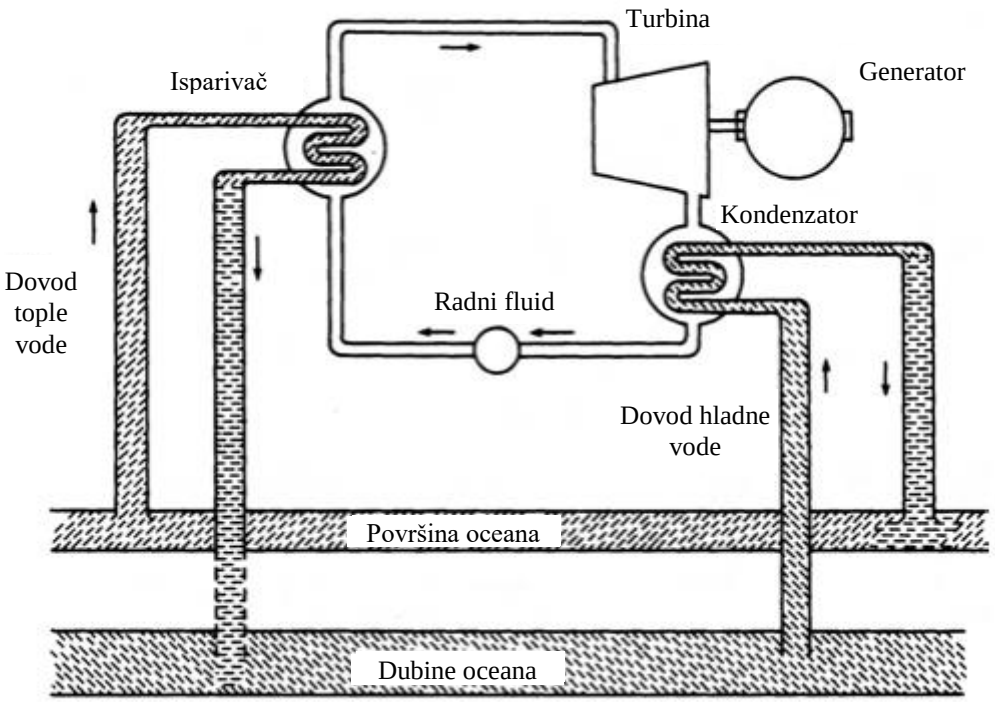


Slika 13. Prikaz postrojenja valnog profila za hvatanje energije valova [22]

2.6. Iskorištavanje toplinske energije oceana

Pretvorba toplinske energije oceana (OTEC) je sustav baznog opterećenja. Djeluje tako što izvlači energiju iz temperaturne razlike koja postoji između tople površinske vode oceana velikih tropskih i suptropskih područja svijeta te dublje vode na tim lokacijama koje teku iz polarnih područja. Moguće su različite varijante OTEC postrojenja, uključujući zatvoreni, Slika 14., i otvoreni ciklus; plutajući, na kopnu, na povišenju, ili „pokretni"; za generiranje električne energije, za akvakulturu, za procese desalinizacije, ili za njihove kombinacije [20].

OTEC sustav je u suštini toplinski stroj sa radnim fluidom niskog vrelišta, npr. amonijak, koji djeluje između hladne temperature vode T_c ispumpane sa značajne dubine i tople temperature, $T_h = T_c + \Delta T$, površinske vode. Radni fluid cirkulira u zatvorenom ciklusu, primajući toplinu iz tople vode i ispuštajući ju u hladnu vodu kroz izmjenjivače topline. Kako se fluid širi, pokreće turbinu, koja zauzvrat pokreće generator električne energije. Radni fluid se hladi hladnom vodom i ciklus se nastavlja. Alternativni sustavi otvorenog ciklusa ima morsku vodu kao radni fluid, a termodinamički principi otvorenog ciklusa slični su zatvorenom ciklusu [22].

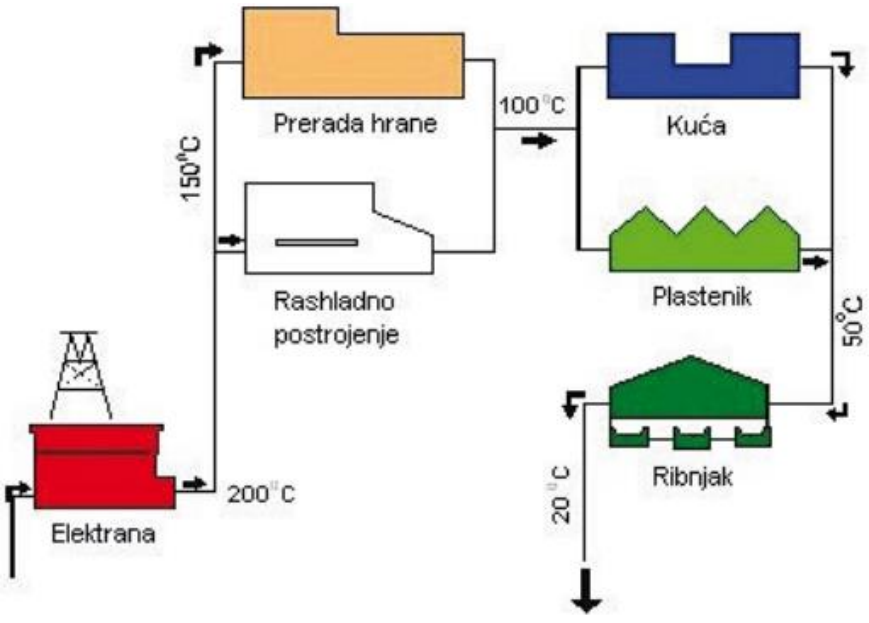


Slika 14. Shematski prikaz OTEC sustava zatvorenog ciklusa [22]

2.7. Geotermalna energija

Geotermalna energija je toplinska energija Zemlje koja je prikladna za izravno korištenje ili za pretvorbu u električnu energiju. Osnovni geotermalni resurs predstavljaju geotermalni fluidi koji se nalaze u podzemnim ležištima, a mogu se dovesti na površinu i iskoristiti. Podzemna ležišta termalnih voda javljaju se u širokom rasponu dubina - od plitkih/površinskih do više kilometara dubokih. Voda u podzemna ležišta obično dolazi procjeđivanjem s površine kroz pukotine u stijenama, a ležišta predstavljaju voda ili vodena para u poroznim ili propusnim stijenama, najčešće zarobljena između slojeva nepropusnih stijena. Radi smanjenja utjecaja na okoliš i zadržavanja kapaciteta ležišta, danas se geotermalna ležišta koriste u zatvorenom sustavu koji podrazumijeva crpljenje termalne vode kroz proizvodnu bušotinu te nakon iskorištavanja njezine topline, vraćanje u ležište kroz utisnu bušotinu [17].

Najučinkovitije korištenje geotermalne energije je kaskadnom primjenom, kao što prikazuje Slika 15. Izravnim korištenjem geotermalne energije smatra se iskorištavanje topline niskotemperaturnih resursa (temperatura vode ispod 90 °C) za zagrijavanje u industrijskim procesima (sušenje papira, voća, povrća, ribe, drveta, vune, izlučivanje soli, destilacija vode, pasterizacija mlijeka i drugo), u poljoprivredi za grijanje staklenika, u akvakulturi za grijanje ribnjaka, za otapanje snijega na pločnicima, u balneologiji (toplice) te u toplinarstvu za grijanje i hlađenje prostora. Visokotemperaturni i srednjotemperaturni resursi mogu se koristiti za proizvodnju električne energije [17].



Slika 15. Upotreba geotermalne energije kaskadnom primjenom [17]

Rad geotermalnih elektrana temelji se na pretvaranju toplinske energije geotermalnog fluida u kinetičku energiju okretanja turbine, a zatim i u električnu energiju. Geotermalne elektrane rade na tri osnovna principa: suha para, separiranje pare i binarni ciklus [17].

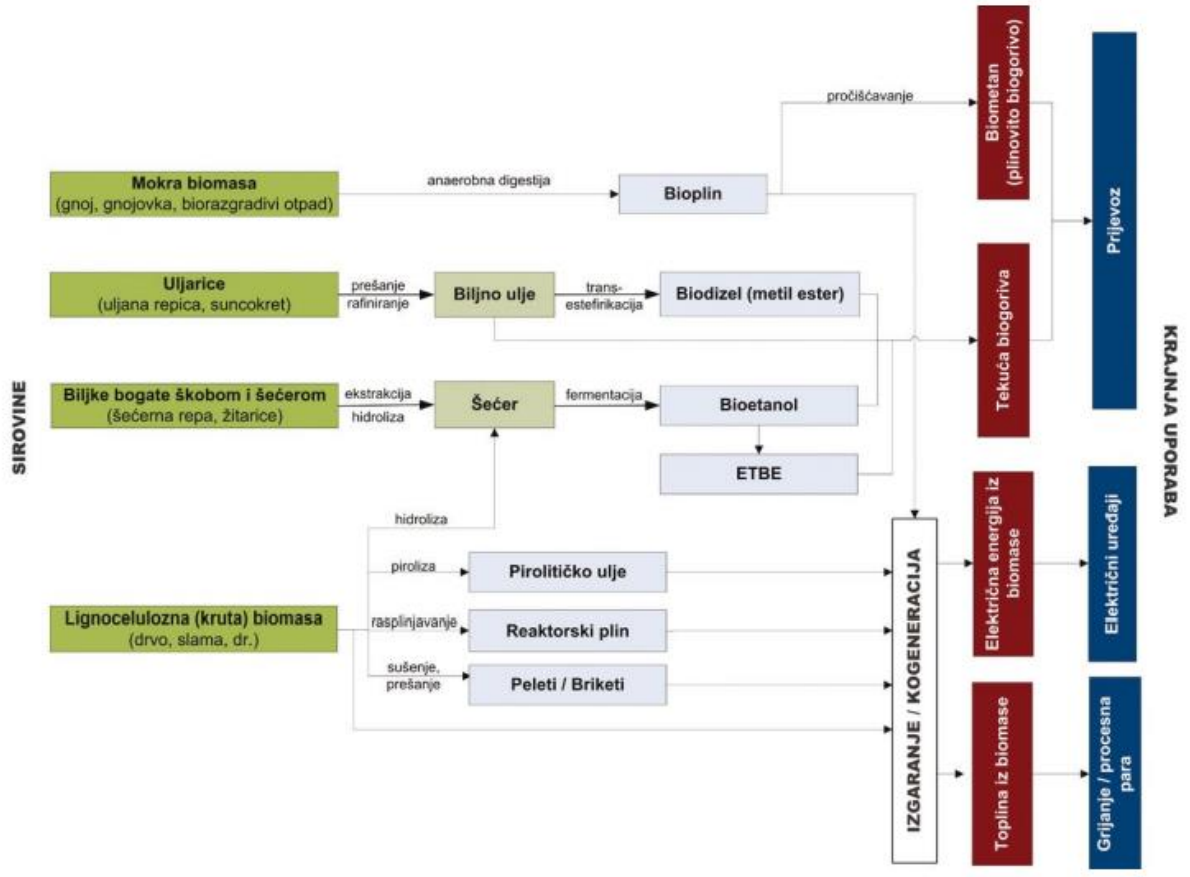
Elektrana na suhu paru koristi vruću paru za pokretanje turbine generatora i predstavlja najjeftiniji i najjednostavniji princip za proizvodnju električne energije iz geotermalnih izvora. Princip separiranja pare koristi se kod visokih temperatura geotermalnih voda (>180 °C). Na ovom principu radi većina modernih geotermalnih elektrana. Voda iz ležišta pumpa se prema površini, a sa smanjenjem tlaka pretvara se u vodenu paru koja pokreće turbine [17].

Binarni ciklus može se koristiti kod visokotemperaturnih i srednjotemperaturnih izvora. Kod ovog tipa elektrana vruća voda koristi se za grijanje radnog fluida koji ima znatno nižu temperaturu vrelišta od vode te isparava na nižoj temperaturi i pokreće turbine generatora. Ovaj princip omogućava veću efikasnost postupka, ali i dostupnost potrebnih geotermalnih resursa, jer je dovoljna niža temperatura vode za proizvodnju električne energije. Iz ovih se razloga većina novih geotermalnih elektrana planira na ovom principu [17].

Geotermalna se energija sve više iskorištava i putem dizalica topline - sustava kojima se toplina tla i stijena podloge može pretvoriti u korisnu toplinsku energiju. Geotermalne dizalice topline mogu se postavljati horizontalno u tlo iskorištavajući stalnu temperaturu tla u gornja 3 metra koja u većini područja iznosi 10-15 °C ili vertikalno u plitkim bušotinama sa sondom, najčešće između 60 i 150 m. Dizalice topline mogu se koristiti za grijanje ili hlađenje prostora te za grijanje potrošne tople vode kako u malim (obiteljske kuće, plastenici/staklenici, ribnjaci itd.) tako i u velikim razmjerima (centralizirani toplinski sustav, industrija) [17].

2.8. Biomasa i otpad

Biomasa je biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka poljoprivredne proizvodnje (biljnog i životinjskog porijekla), šumarske i srodnih industrija. Energija iz biomase dolazi u čvrstom, tekućem (npr. biodizel, bioetanol, biometanol) i plinovitom stanju (npr. bioplin, plin iz rasplinjavanja biomase i deponijski plin) [16]. Biomasa se može koristiti za direktnu pretvorbu biomase u električnu energiju i toplinu ili pretvorbu u goriva. Slika 16. prikazuje različite korake pretvorbe sirovina u krajnji oblik prikladan za uporabu.



Slika 16. Shema mogućih koraka pretvorbe biomase [17]

Biomasa je obnovljivi izvor energije, a općenito se može podijeliti na drvnu te nedrvnu masu i životinjski otpad, unutar čega se mogu razlikovati [16]:

- drvna biomasa (ostaci iz šumarstva, otpadno drvo),
- drvna uzgojena biomasa (brzorastuće drveće),
- nedrvna uzgojena biomasa (brzorastuće alge i trave),
- ostaci i otpaci iz poljoprivrede,
- životinjski otpad i ostaci,
- gradski i industrijski otpad.

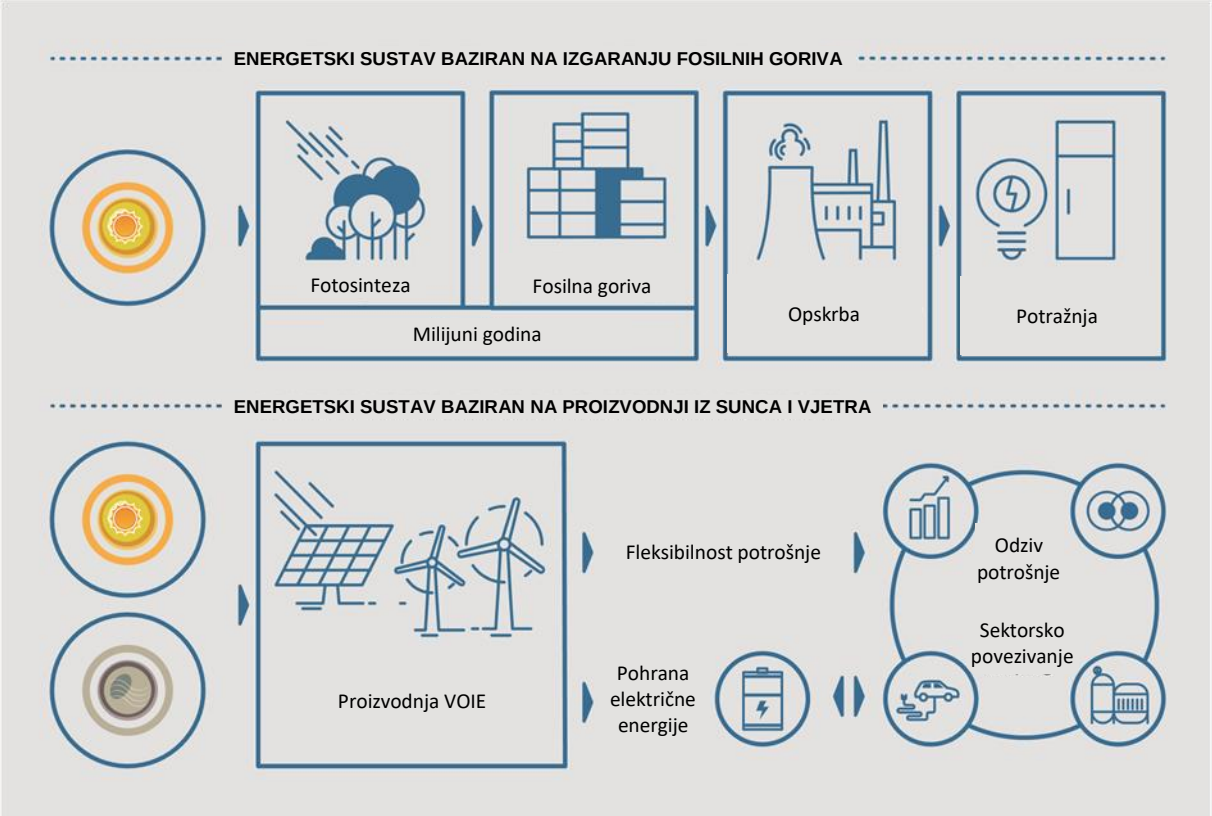
Glavna prednost korištenja biomase kao izvora energije su obilni potencijali, ne samo kao zasađene biljne kulture, već i otpadni materijali u poljoprivrednoj i prehrambenoj industriji. Plinovi koji nastaju korištenjem biomase mogu se također iskoristiti u proizvodnji energije. U odnosu na fosilna goriva prednost je i neusporedivo manja emisija štetnih plinova i otpadnih

tvari. Računa se da je opterećenje atmosfere s CO_2 pri korištenju biomase kao gorivo zanemarivo, budući da je količina emitiranog CO_2 prilikom izgaranja jednaka količini apsorbiranog CO_2 tijekom rasta biljke – ukoliko su sječa i prirast drvne mase u održivom odnosu [16].

Međutim, za razliku od fosilnih goriva, biomasa je često ograničena gustoćom energije pohranjenog goriva. Stoga se mora proizvoditi i trošiti lokalno, jer bi potrošnja energije vezana za transport na velike udaljenosti mogla čak premašiti potrošnju samog goriva. To znači da su jedinice za proizvodnju energije na biomasu relativno male u usporedbi s konvencionalnim postrojenjima [15].

3. PREGLED TEHNOLOGIJA FLEKSIBILIZACIJE U SEKTORU POTROŠNJE

Energetski sustavi bazirani na varijabilnim obnovljivim izvorima energije, čija se proizvodnja ne može direktno kontrolirati, predstavljaju izazov u održavanju stabilnosti elektroenergetske mreže, bez ugroze sigurne i zadovoljavajuće opskrbe. Stoga su potrebna nova tehnološka rješenja koja bi naglasak stavila na fleksibilnost, a shodno tome, i dekarbonizaciju sustava. Takvi sustavi žele omogućiti da potrošnja slijedi proizvodnju u odnosu na tradicionalni pristup proizvodnje električne energije koja prati potrošnju. Primjenjive tehnologije u različitim sektorima potrošnje, sa svrhom dekarbonizacije i pružanja fleksibilnosti, okvirno se mogu podijeliti kao tehnologije fleksibilne potrošnje i tehnologije skladištenja energije.



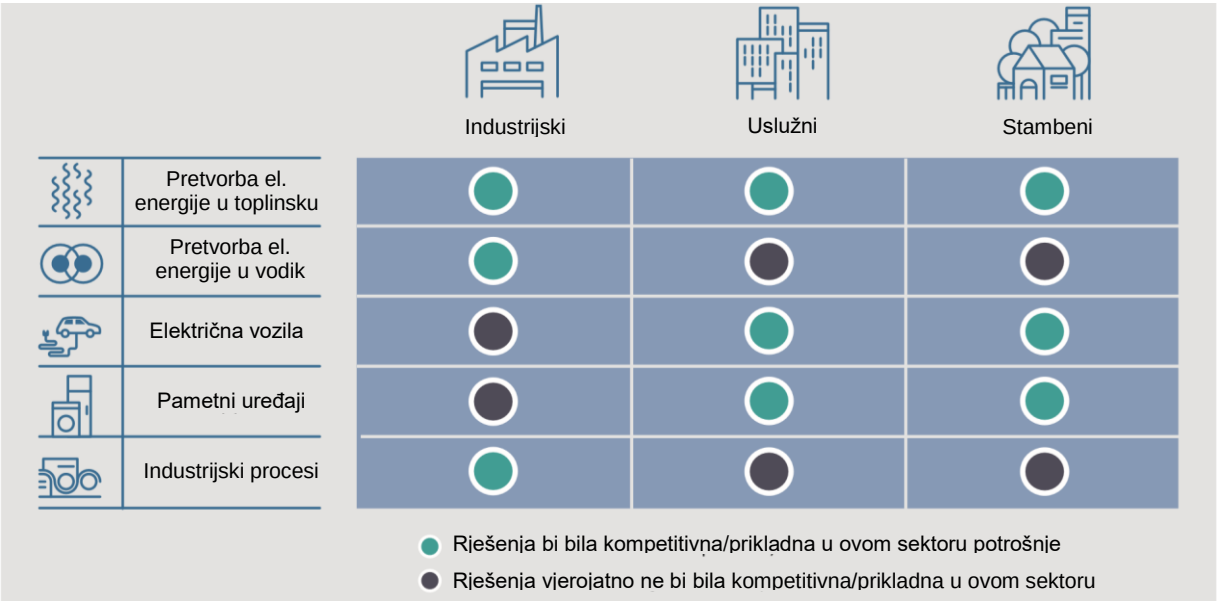
Slika 17. Struktura energetskog sustava prije i danas s različitom ulogom potrošnje [23]

3.1. Fleksibilnost potrošnje

Fleksibilnost potrošnje može se definirati kao dio potražnje, uključujući i onu koja dolazi iz elektrifikacije ostalih energetskih sektora (npr. promet ili sektorsko povezivanje), koja se može smanjiti, povećati ili pomaknuti u određenom vremenskom razdoblju kako bi se [23]:

1) olakšala integracija VOIE preoblikovanjem profila opterećenja da odgovara proizvodnji iz VOIE,
2) smanjilo vršno i sezonsko opterećenje,
3) smanjili proizvodni troškovi premještanjem opterećenja s razdoblja visokih cijena opskrbe u razdoblja nižih cijena.

Fleksibilnost potrošnje može se osigurati samo skupom tehnologija koje su, s obzirom na svoje karakteristike, prikladne za kontrolu i mogu se pronaći u industrijskom, uslužnom i stambenom sektoru. To su: pretvorba električne u toplinsku energiju (P2H, *engl. Power-to-Heat*), pretvorba električne energije u vodik (P2H2, *engl. Power-to-hydrogen*), električna vozila, odziv potrošnje kućanskih uređaja i industrijske potražnje, kao što prikazuje Slika 18.



Slika 18. Tehnologije fleksibilnosti potrošnje po krajnjim korisnicima [23]

3.1.1. Pretvorba električne energije u toplinsku energiju

Elektrifikacija toplinskog sustava može povećati vršnu potražnju i brzinu dostupnosti energije (na primjer kada se tijekom hladnog razdoblja svi uređaji za grijanje istovremeno uključe) i nameće dodatne zahtjeve na pouzdanost sustava koji nije bio dobro planiran. Međutim, ako je sektorsko povezivanje dobro određeno, elektrifikacija toplinskog sustava (pomoću Power-to-heat koncepta) može doprinijeti integraciji VOIE i dekarbonizaciji. Kako bi se to postiglo, toplinske potrebe treba osigurati uređajima kao što su dizalice topline ili električni bojleri koji

se također mogu kombinirati sa sustavima pohrane toplinske energije pružajući dodatnu fleksibilnost [23].

Dizalice topline su uređaji koji prenose toplinu s niskotemperaturnih izvora topline, toplinskog spremnika, do visokotemperaturnih spremnika topline, rashladnog spremnika, uporabom kompresora koji koristi električnu energiju. Dizalice topline su karakterizirane kao visoko učinkoviti uređaji. Toplinski množitelj (COP) predstavlja omjer između dobivene toplinske energije i količine električne energije koju dizalica topline koristi za svoj rad (jedna jedinica električna energija može proizvesti 4 do 5 jedinica korisne topline). Osim toga, neke se dizalice topline mogu kontrolirati da njihova proizvodnja bude promjenljiva u odnosu na potrebe. Obično se koriste za grijanje i hlađenje prostora u stambenim, uslužnim i industrijskim namjenama [23].

Električni bojleri ili električni zagrijači vode su uređaji koji koriste električnu energiju za zagrijavanje vode. U njima struja teče kroz grijaći element, koji zbog svog visokog omskog otpora proizvodi toplinu prema Joulevom zakonu. Njihova učinkovitost je 100% što je niže nego kod dizalica topline, budući da ne koriste vanjski izvor topline, ali viša od konvencionalnih kotlova na fosilna goriva [23].

Termička pohrana je vrsta skladištenja energije s kapacitetom da apsorbira i oslobađa toplinu (ili rashladnu energiju), kada je potrebno. Toplina se može pohraniti u obliku osjetne i latentne topline, termokemijskih spremnika energije i pohrane u termo-mehaničkim sustavima [21].

Power-to-heat može se decentralizirati, što znači da svaki potrošač posjeduje uređaj za grijanje (npr. dizalice topline, električni bojleri ili izravno grijanje), ili se može centralizirati, gdje se potrošači opskrbljuju toplinom kroz CTS. Centralizirani toplinski sustav je način opskrbe stambenih i uslužnih zgrada te industrijskih korisnika sa toplinom za grijanje prostora, toplom vodom i procesnom toplinom kroz toplinsku distribucijsku mrežu, sposobnu za pohranjivanje značajne toplinske energije [23]. Višak topline nastao u ne-energetskim, industrijskim ili komercijalnim procesima, ili u kogeneracijskim postrojenjima može se iskoristiti pohranjivanjem u distribucijsku mrežu, kratkotrajno u spremnike topline sa svrhom uklanjanja vršnih opterećenja, npr. akumulatori topline, ili sezonski u velike podzemne spremnike.

3.1.2. Pretvorba električne energije u vodik

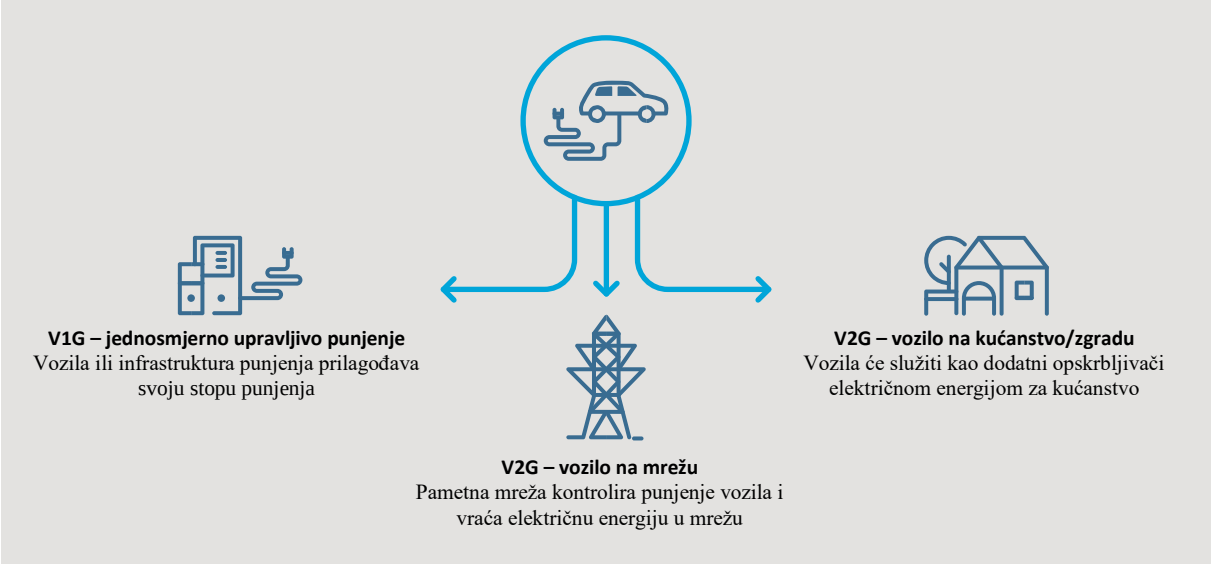
Power-to-hydrogen je proces pretvaranja električne energije u vodik. Vodik je nositelj energije, kao i električna energija. Proizvodnja vodika iz obnovljivih izvora postiže se preko elektrolizatora sektorskim povezivanjem sektora vodika i električne energije. Elektrolizatori su uređaji koji koriste električnu energiju za cijepanje vode u vodik i kisik te mogu osigurati fleksibilnost potrošnje prilagodbom proizvodnje vodika prema krivuljama proizvodnje iz energije vjetra i sunca u razdobljima njihove visoke dostupnosti (i stoga niske cijene električne energije), a također može osigurati i usluge balansiranja elektroenergetske mreže. Dodatno, vodik se može ubrizgati i pohraniti u plinsku mrežu ili dugoročno u namjenska skladišta vodika, što omogućuje učinkovito pohranjivanje viška proizvodnje VOIE pružanjem sezonskog skladištenja [23]. Korištenjem električne energije za proizvodnju plinovitih goriva (P2G), najčešće vodika, daljnjim procesima hidrogenacije može se dobiti sintetički prirodni plin, elektrogoriva, bio-dizel ili bio-etanol, ili amonijak.

3.1.3. Električna vozila

Treća mogućnost sektorskog povezivanja je omogućena kroz elektrifikaciju transporta električnim vozilima. Električna vozila (EV) mogu imati različite strategije punjenja. Najjednostavniji način obično se naziva nekontrolirano punjenje i predstavlja punjenje EV-a na maksimalnu snagu čim se priključe na mrežu. Ova strategija punjenja nije fleksibilna i može predstavljati poteškoće za elektroenergetski sustav ako je broj povezanih EV-a velik, povećavajući vršno opterećenje i zahtjeve za brzinom dostupnosti energije te tako nametnuti dodatne probleme fleksibilnosti sustava. Ovaj se problem može riješiti usvajanjem pametnog punjenja. Pametno punjenje definira se kao način optimizacije procesa punjenja prema ograničenjima distribucijske i/ili prijenosne mreže, lokalne dostupnosti obnovljivih izvora energije i preferencija kupaca. Kada se pune pametno, električna vozila mogu pružiti fleksibilnu potrošnju kada su cijene niske slijedeći dostupnost VOIE i izbjegavati punjenje tijekom niže proizvodnje kada su cijene vrlo visoke uzrokujući, između ostalog, manji pritisak na distribucijsku i prijenosnu mrežu. Parametri punjenja, npr. postotak napunjenosti u satu, mogu se automatizirati punjačem tako da se cilj ostvari fleksibilnim načinom najboljim za potrošača, ali i mrežu. Dvije glavne vrste strategija interakcije vozila i mreže su [23]:

1) jednosmjerno upravljanje (također nazvano V1G),

2) dvosmjerno upravljanje (vozilo-na-sve (*engl. vehicle-to-everything*), V2X), koje se dodatno može podijeliti:
   - vozilo na kućanstvo (*engl. vehicle-to-home*, V2H),
   - vozila na mreži (*engl. vehicle-to-grid*, V2G).



Slika 19. Načini pametnog punjenja električnih vozila [23]

3.1.4. Pametni uređaji

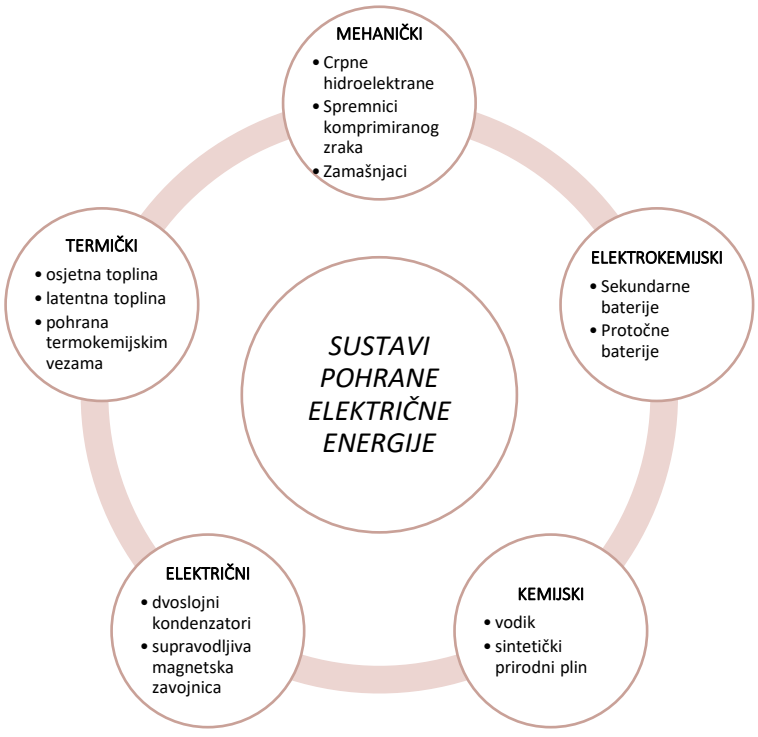
Pojedini uređaji, bilo kućanski ili uslužni, također se mogu koristiti za pružanje fleksibilne potrošnje ako je dostupna odgovarajuća infrastruktura informacijsko-komunikacijskih tehnologija (IKT) (na primjer, pametna brojila, senzori, komunikacijska tehnologija, internet stvari itd.). Uporaba pametnih uređaja ovisi o ponašanju potrošača i stoga se koncept ove vrste fleksibilne potrošnje oslanja na potrošača koji reagira na cjenovne signale i koristi uređaje tijekom razdoblja niskih cijena. Pametni uređaji mogli bi dodati značajan volumen fleksibilnosti sustava na strani potrošnje, međutim, imaju ograničenja povezana s dostupnosti i ponašanjem potrošača. Na primjer, za većinu uređaja, potrošači mogu prebaciti svoje opterećenje na druga razdoblja, ali samo na ograničeno vrijeme [23]. Automatizacijom pametnih uređaja oni mogu djelovati i neovisno o ponašanju potrošača uz uvjet da ono ne utječe na njegovo zadovoljstvo. Automatizacija povlači pitanja sigurnosti, na primjer od računalnih napada koji bi manipulirali potrošnjom, ali i zaštite privatnosti prilikom praćenja potrošnje, navika i ponašanja potrošača.

3.1.5. Industrijski procesi

Industrijski potrošači mogu koristiti rješenja pretvorbe električne energije u toplinsku energiju ili vodik kao dio svog potencijala fleksibilne potrošnje, međutim, industrija ima i druge procese koji zahtijevaju električnu energiju te pomičući njihovu potražnju, unutar određenog vremenskog okvira, također mogu pružiti određenu fleksibilnost potrošnje ako je potrebno. Primjeri ovih procesa uključuju proizvodnju cementa, elektrolučne peći za proizvodnju čelika, električne peći, proizvodnja aluminija, proizvodnja drvne celuloze i proizvodnja papira [23].

3.2. Tehnologije pohrane električne energije

Sustavi skladištenja električne energije omogućuju pohranu viška električne energije te na taj način smanjuju opterećenje mreže zbog učestalih promjena u opskrbi energijom kao rezultat varijacija u proizvodnji energije pomoću OIE. Široko primijenjen pristup klasifikacije sustava za pohranu električne energije je utvrđivanje prema obliku korištene energije. Sustavi su razvrstani u mehaničke, elektrokemijske, kemijske, električne i sustave za pohranu toplinske energije. Vodik i sintetički prirodni plin su sekundarni nosioci energije i mogu se koristiti za pohranu električne energije elektrolizom vode za proizvodnju vodika i, dodatnim korakom, metana [23].



Slika 20. Različiti načini sustava pohrane energije

Uređaji za pohranu energije, koji se mogu puniti tijekom razdoblja male potražnje i prazniti tijekom razdoblja velike potražnje, uvelike pridonose u stabilizaciji elektroenergetskog sustava. Ovisno o karakteristikama tehnologija, one mogu olakšati integraciju obnovljivih izvora, poduprijeti fleksibilizaciju, i posljedično, dekarbonizaciju sustava.

3.2.1. Mehanički sustavi za pohranu energije:

Crpne (reverzibilne) hidroelektrane: Crpna hidroelektrana najstarija je i najveća od svih komercijalno dostupnih tehnologija skladištenja energije, s postojećim objektima veličine do 1000 MW. Konvencionalna crpna hidroelektrana koristi dva, okomito odvojena, spremnika vode. Energija se pohranjuje pomicanjem vode iz nižeg u viši rezervoar, a oslobađa se protokom vode natrag u niži rezervoar. Energija se pohranjuje prema temeljnom fizikalnom principu potencijalne energije [15].

Spremnici komprimiranog zraka: Osnovni koncept pohrane komprimiranog zraka je prilično jednostavan. Spremnici se pune upotrebom kompresora na električni pogon, koji pretvara električnu u potencijalnu energiju, točnije eksergiju, stlačenog zraka. Zrak pod tlakom pohranjuje se u spremnike komprimiranog zraka bilo koje vrste i zatim se ekspanzijom zraka kroz zračnu turbinu ispušta nakon ponovne potražnje za proizvodnjom električne energije [24].

Zamašnjaci: Većina modernih sustava za pohranu energije uz pomoć zamašnjaka sastoje se od masivnog rotirajućeg cilindra koji je na statoru poduprt magnetski levitiranim ležajevima koji eliminiraju njihovo trošenje i povećavaju vijek trajanja sustava. Za održavanje učinkovitosti, sustav zamašnjaka radi u okruženju niskog vakuuma kako bi se smanjio otpor. Zamašnjak je spojen na motor/generator montiran na stator koji, putem energetske elektronike, stupa u interakciju s mrežom [15]. Ubrzavanjem zamašnjak pohranjuje energiju, a prilikom usporavanja oslobađa energiju.

3.2.2. Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije:

Sekundarne baterije: Sekundarne baterije omogućuju pretvorbu električne energije u kemijsku energiju, pohranjivanje te pretvorbu natrag u električnu energiju. Baterije se sastoje od tri osnovna dijela: negativne elektrode, pozitivne elektrode i elektrolita.

Negativna elektroda predaje elektrone vanjskom opterećenju, a pozitivna elektroda prima elektrone iz opterećenja. Elektrolit osigurava put za prijenos naboja između dviju elektroda. Kemijske reakcije između svake elektrode i elektrolita uklanjaju elektrone s pozitivne elektrode i polažu ih na negativnu elektrodu. To opisuje sveukupnu kemijsku reakciju koja predstavlja punjenje i pražnjenje baterije [15]. Najšire korištene baterije su na bazi: olovo-kiselina, litij-ion, baterije bazirane na niklu, cink-zrak, natrij-sulfat, natrij-nikal-klorid.

Protočne baterije: Protočne baterije pohranjuju i oslobađaju električnu energiju pomoću reverzibilne elektrokemijske reakcije u dva tekuća elektrolita. Elektrokemijska ćelija ima dva odjeljka, po jedan za svaki elektrolit, fizički odvojena membranom za ionsku izmjenu. Elektroliti ulaze i izlaze iz ćelije kroz odvojene razdjelnike i prolaze kroz kemijsku reakciju unutar ćelije, s izmjenom iona ili protona kroz membranu i izmjenom elektrona kroz vanjski električni krug. Kemijska energija u elektrolitima pretvara se u električnu energiju i obrnuto prilikom punjenja [15]. Najpoznatije protočne baterije su: vanadij-redoks, željezo-krom, cink-brom.

3.2.3. Kemijski sustavi za pohranu električne energije

Vodik: Tipičan sustav za skladištenje vodika sastoji se od elektrolizatora, spremnika za pohranu vodika i gorive ćelije. Elektrolizator je elektrokemijski pretvarač koji cijepa vodu prolaskom struje u vodik i kisik. To je endotermni proces, tj. toplina je potrebna tijekom reakcija. Vodik se skladišti pod tlakom u plinskim bocama ili spremnicima, a to se može učiniti praktički na neograničeno vrijeme. Za generiranje električne energije, oba plina struje u gorivu ćeliju gdje se odvija elektrokemijska reakcija obrnuta procesu cijepanja vode: reakcijom vodika i kisika nastaje voda, oslobađa se toplina, a proizvodi se električna energija. Iz ekonomskih i praktičnih razlozi, kisik se ne pohranjuje nego se ispušta u atmosferu tijekom elektrolize i dohvaća iz zraka za proizvodnju električne energije. Postoje različiti pristupi skladištenja vodika, bilo kao plin pod visokim tlakom, u tekućem stanju na vrlo niskim temperaturama, adsorbiran na metalne hidride ili kemijski vezan u složene hidride. Međutim, za stacionarne primjene plinovito skladišten vodik pod tlakom je najučestaliji izbor. Uz gorive ćelije, plinski motori, plinske turbine i kombinirani ciklusi plinske i parne turbine mogući su izbor za proizvodnju električne

energije. Vodikovi sustavi s gorivim ćelijama i plinskim motorima mogu se koristiti za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije u decentraliziranim sustavima [24].

Sintetički prirodni plin: Sinteza metana je druga opcija za pohranu električne energije u obliku kemijske energije. Ovdje je potreban dodatni korak nakon procesa cijepanja vode u elektrolizatoru, korak u kojem reakcijom vodika i ugljikovog dioksida nastaje metan u reaktoru za metanaciju. Kao što je slučaj s vodikom, proizveden sintetički prirodni plin može se skladištiti u tlačnim spremnicima, pod zemljom ili se unijeti izravno u plinsku mrežu. Moguća su nekoliko izvora CO_2 za proces metanacije, kao što su elektrane na fosilna goriva, industrijska ili bioplinska postrojenja [25].

3.2.4. Električni sustavi za pohranu električne energije

Dvoslojni kondenzatori: elektrokemijski dvoslojni kondenzatori, također poznati kao superkondenzatori, je tehnologija koja je poznata već 60 godina, no još uvijek ima veliki razvojni potencijal koji bi mogao dovesti do još veće kapacitivnosti i gustoće energije od konvencionalnih kondenzatora. Dvije glavne karakteristike su izuzetno visoke vrijednosti kapacitivnosti, reda nekoliko tisuća farada, te mogućnost vrlo brzog punjenja i pražnjenja zbog izvanredno niske unutarnje otpornosti čija svojstva nisu raspoloživa kod konvencionalnih baterija. Ostale prednosti su dugotrajnost, visoka pouzdanost, nema potrebe za održavanjem, dug životni vijek i rad u širokom temperaturnom rasponu i u raznolikom okruženju (vruće, hladno i vlažno) [25].

Supravodljiva magnetska zavojnica: Sustavi pohrane energije u supravodljivoj magnetskoj zavojnici rade prema načelu elektrodinamike. Energija je pohranjena u magnetskom polju kojeg stvara tok istosmjerne struje u supravodljivom svitku, koji se drži ispod svoje supravodljive kritične temperature. Sustav karakterizira visoka ukupna učinkovitost (85% - 90%) i vrlo velika izlazna snaga koja se može osigurati u vrlo kratkom vremenu. U načelu, energija se može pohraniti na neodređeno sve dok radi sustav hlađenja, ali duže vrijeme skladištenja je ograničeno energetskim potrebama rashladnog sustava [25].

3.2.5. Termički sustavi za pohranu električne energije

Osjetna toplina: Skladištenje osjetne topline jedna je od najpoznatijih i najraširenijih tehnologija, npr. spremnik tople vode za kućanstvo. Medij za pohranu može biti tekućina kao što je voda ili termo-ulje, odnosno krutina kao npr. beton ili zemlja. Toplinska energija se pohranjuje isključivo kroz promjene temperature medija za pohranu. Kapacitet skladišnog sustava definiran je specifičnim toplinskim kapacitetom i masom korištenog medija [25].

Latentna toplina: Latentno skladištenje topline ostvaruje se korištenjem materijala s promjenom faze kao medija za pohranu. Latentna toplina je energija razmijenjena tijekom promjene agregatnog stanja kao što je otapanje leda. Postoje organski (parafini) i anorganski materijali (hidrati soli) dostupni kao mediji za ove sustave skladištenja. Prednost skladištenja latentne topline je njegov kapacitet pohrane velike količine energije u malom volumenu i uz minimalnu promjenu temperature, što omogućuje učinkovit prijenos topline [25].

Pohrana termokemijskim vezama: Ovi sustavi skladištenja djeluju kao termo-kemijske dizalice topline u vakuumskim uvjetima i sa složenijom izvedbom. Toplina iz visokotemperaturnog izvora zagrijava adsorber (npr. silika gel ili zeolit), a para (radni fluid, npr. voda) se desorbira iz adsorbera i kondenzira u kondenzatoru na niskim temperaturama. Toplina kondenzacije se povlači iz sustava. Osušeni adsorber i izdvojeni radni fluid mogu se neograničeno pohraniti. Tijekom procesa pražnjenja, radni fluid preuzima niskotemperaturnu toplinu u isparivaču. Zatim se para radne tekućine adsorbira na adsorberu i toplina adsorpcije se oslobađa s visokim temperaturama [25].

4. METODE

U ovom radu želi se analizirati osjetljivost budućih konfiguracija energetskog sustava s obzirom na dostupnost resursa, što nije bio slučaj u prijašnjim analizama koje su koristile univerzalne krivulje dostupnosti resursa za velika područja ili za samo jednu godinu u promatranom periodu tranzicije. Sve intenzivnijom elektrifikacijom sektora potrošnje energije, nastoji se omogućiti energetska tranzicija na obnovljive izvore i smanjiti emisije stakleničkih plinova. Proizvodnja u sustavima s visokim udjelom obnovljivih izvora energije uvelike ovisi o vremenskim uvjetima. Kako bi se osigurala stabilnost elektroenergetske mreže prilikom integracije OIE, posebno VOIE, jedna od važnih sastavnica budućih energetskih sustava bit će uravnoteženje i fleksibilnost sustava. Sektori energetskog sustava, proizvodnja električne energije, grijanje, promet i industrija, sektorski će se povezati i odgovarati na međusobne zahtjeve potrošnje i proizvodnje energije.

Prilikom planiranja budućih konfiguracija u obzir se, uz tražene kapacitete, moraju uzeti i ciljevi energetske tranzicije, potencijal tehnologija OIE te tehnologije skladištenja i fleksibilnosti potrošnje, njihova ekonomska isplativost, društvena prihvatljivost, mogućnost sektorskog povezivanja i pružanja fleksibilnosti sustavu. Stoga će se u ovom radu, prema projekcijama potrošnje budućih sustava i njihovih ograničenja, simulirati buduće konfiguracije koje će u obzir uzeti moguće razine dostupnosti različitih resursa. Dostupnost će se modelirati prema povijesnim podacima i prognozama budućih kretanja, a sve će se simulirati u optimizacijskom softveru otvorenog koda H2RES, koji je razvijen u sklopu INTERENERGY projekta na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

4.1. H2RES

H2RES je linearni optimizacijski model dugoročnog ulaganja u energetske kapacitete sa satnom razdiobom koji simulira najekonomičniju kombinaciju tehnologija opskrbe energije različitih sektora [26]. Sastoji se od tri glavne skupine varijabla odlučivanja [27]:

- proširenje kapaciteta na godišnjoj bazi power-to-X tehnologija i svih oblika postrojenja za proizvodnju električne energije,
- satno modeliranje distribucija svih tehnologija i postrojenja za proizvodnju električne energije,
- satna razina skladištenja energije za sve tehnologije s mogućnošću pohrane.

Optimizacijom varijabla pruža se optimalna:

- veličina ili kapacitet sustava (ulaganja u različite tehnologije ili elektrane),
- distribucija energije,
- pretvorba energetskih nosioca,
- razina napunjenosti sustava pohrane energije (SOC),
- višak proizvodnje električne energije (CEEP), itd.

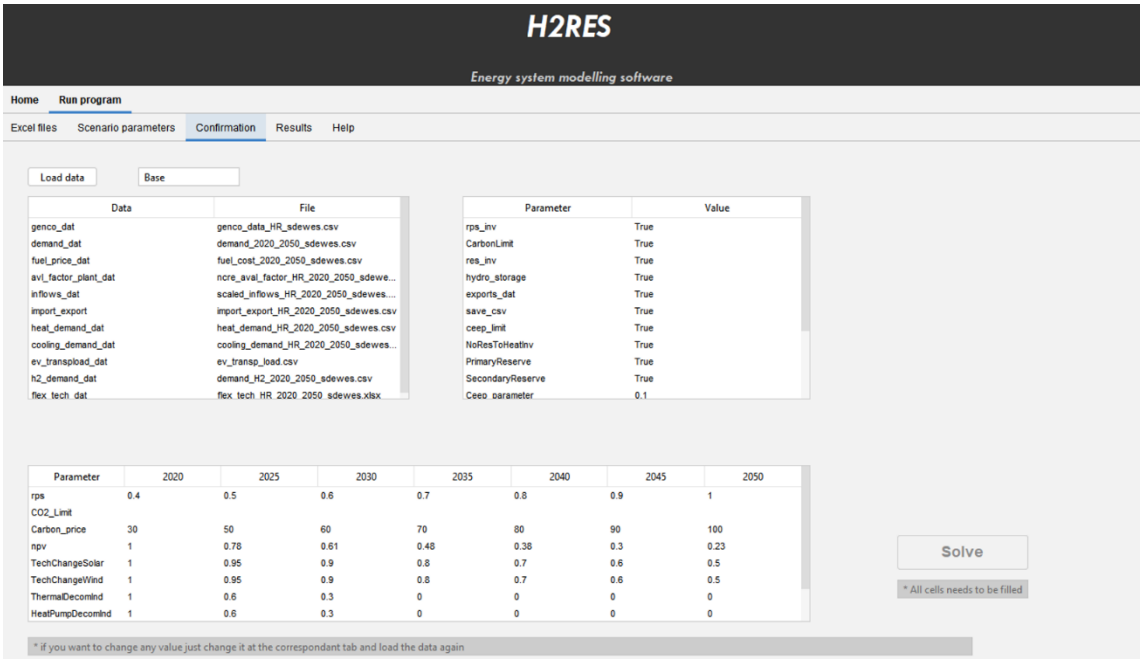
Optimizacija se provodi u skladu s različitim željenim strateškim opcijama, uključujući ograničenja CEEP-a, prodor OIE i ograničenja CO_2 (CO_2e) [26]. CEEP predstavlja višak proizvodnje električne energije koja nadilazi mogućnosti iskorištenja električne energije. On je teorijski pojam koji govori za koliko bi se proizvodnja morala smanjiti u slučaju prekomjerne proizvodnje. Ograničenje CEEP-a se najčešće daje u obliku postotka koji predstavlja omjer viška proizvedene električne energije u odnosu na izvezenu električnu energiju.

H2RES je napisan u besplatnom programskom jeziku Python [50] te je potrebno njegovo minimalno znanje za upotrebu H2RES modela. Model se rješava matematičkim softverom GUROBI [51], besplatnim za akademsku upotrebu, što H2RES čini pristupačnim i široko dostupnim. Glavni dijelovi radnog područja su:

- *Data*: sve ulazne datoteke i obavezni podaci potrebni za H2RES,
- *Results*: rezultati svakog scenarija,
- *Scripts*: skripte za čitanje i obradu podataka, izradu i rješavanje modela te ispisivanje rezultata,
- *Main.py*: glavna skripta za postavljanje karakteristika scenarija i pokretanje H2RES-a.

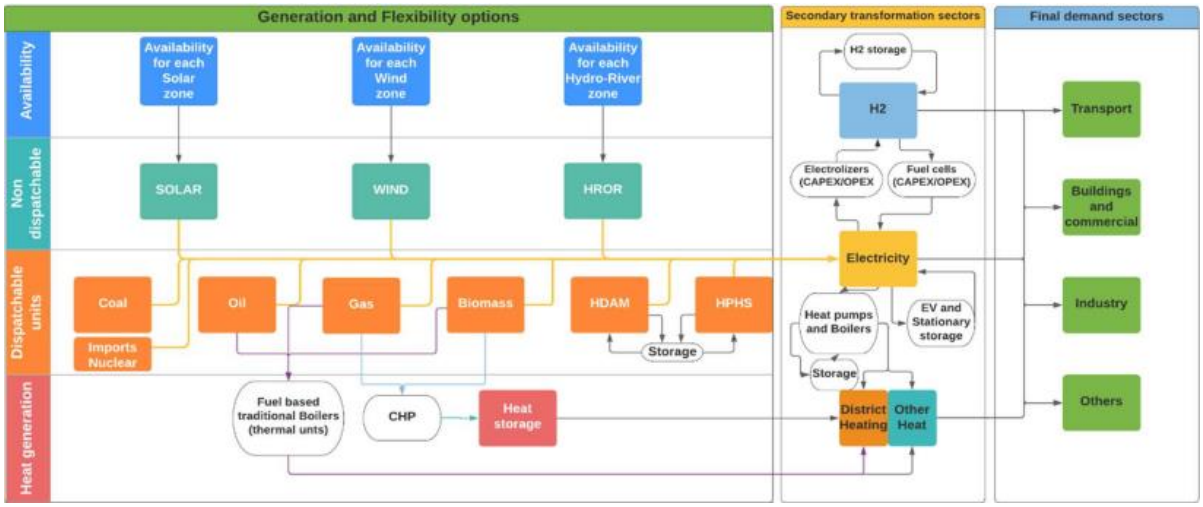
Izlaz podataka čine automatska izvješća sa sažetkom glavnih rezultata, primjeri dijagrama za jednostavnu provjeru rezultata i CSV datoteke za različite podatke od interesa [26].

Trenutno je u izradi korisničko sučelje koje bi olakšalo upotrebu programa i korisnicima koji nisu upoznati s radom u Pythonu. Izgled sučelja, sa karticom za potvrdu podataka koja obavještava korisnike jesu li unijeti svi potrebni podaci, prikazuje Slika 21.



Slika 21. Izgled korisničkog sučelja H2RES-a

H2RES nastoji zadovoljiti potrebe potrošnje energije (električna i toplinska energija, vodik, fosilna goriva) u sektorima prometa, industrije, kućanstva i uslužnog sektora, s ciljem minimiziranja ukupnih troškova sustava, fiksnih i varijabilnih, uz poštivanje zadanih ograničenja. Budući da je model namijenjen razvoju budućih energetskih sustava, svi budući troškovi dovedeni su na neto sadašnju vrijednost. Komponente H2RES modela uključuju energetski sektor, sektor grijanja, proizvodnju i potražnju vodika, s posebnom obradom energetskih potreba u sektoru industrije, kao što prikazuje Slika 22. [27].

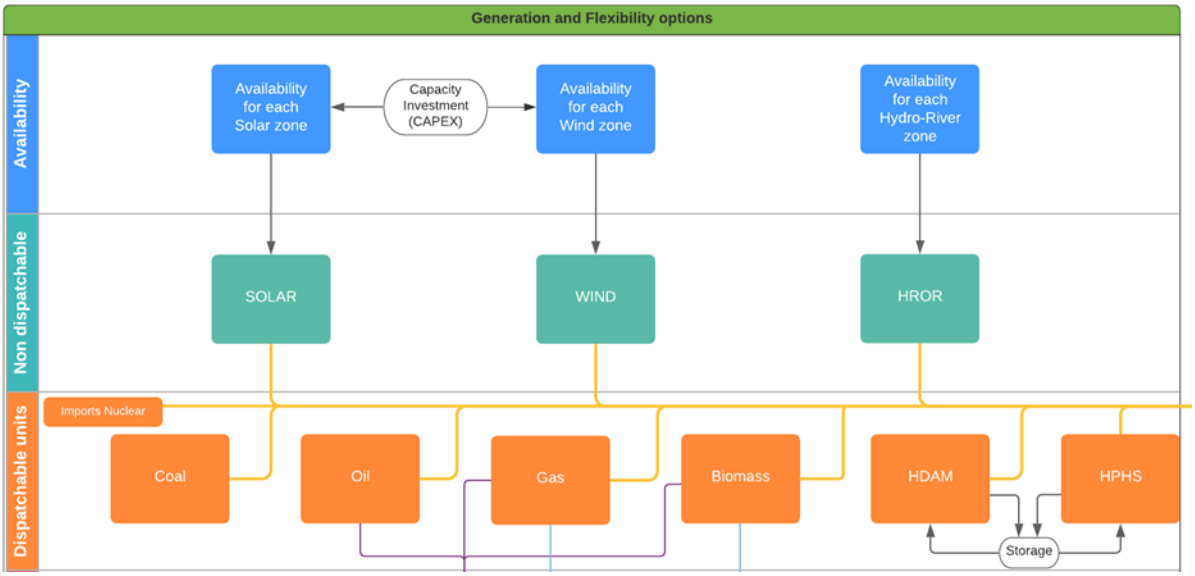


Slika 22. Shema H2RES modela [27]

Ograničenja, odnosno ciljevi prodora OIE, CEEP-a, granica CO_2, maksimalnih kapaciteta, karakteristika i troškova tehnologija, goriva i emisija predstavljaju smjernice strategije razvoja budućih energetskih sustava prema kojim će se simulacijom dobiti konfiguracija sustava uz najmanje moguće troškove i zadovoljavanje svih energetskih potreba. Moguća je provedba u više različitih načina simulacije, svake godine ili svakih nekoliko. Također, može se odvojeno simulirati samo dio godine od interesa za istraživanje.

4.1.1. Struktura H2RES-a

Potražnja električne energije: H2RES razlikuje postrojenja koja mogu i ne mogu odgovoriti na zahtjeve mreže, kao što prikazuje Slika 23. Za postrojenja s izvorima koja ne mogu odgovoriti na zahtjeve mreže, odnosno mogu samo smanjiti proizvodnju ili dolazi do nastanka CEEP-a, kao što su vjetar, sunce i protočne hidroelektrane, moguće je definiranje više zona proizvodnje budući da se njihove karakteristike, odnosno faktori opterećenja, mogu značajno razlikovati s obzirom na zemljopisno područje. Svaka zona zahtijeva zasebne ulazne podatke (potencijal, profil dostupnosti, troškove ulaganja) i svaka je zasebno optimirana. Postrojenja koja mogu odgovoriti na zahtjeve mreže uključuju postrojenja na ugljen, naftu, prirodni plin, biomasu, nuklearne i hidroelektrane. Uvoz električne energije također se smatra da može odgovoriti na zahtjeve mreže, ograničene prema unaprijed definiranim neto prijenosnim kapacitetom [27]. Prilikom izrade modela definiraju se postojeći proizvodni kapaciteti i njihove karakteristike, a tijekom simulacije oni se optimiziraju za naredna razdoblja.

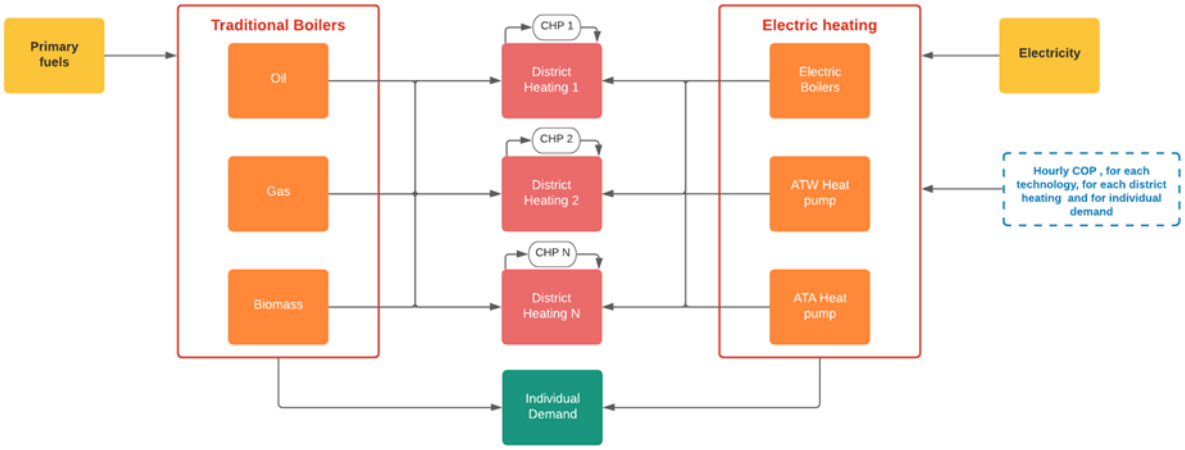


Slika 23. Shema postrojenja za proizvodnju električne energije u H2RES-u [26]

Potražnja toplinske i rashladne energije: Postoje dvije izravne veze između elektroenergetskog sektora i sektora toplinske energije. Prvo, H2RES ima mogućnost upotrebe kogeneracijskih postrojenja te svakoj pripada jedna krivulja toplinskog opterećenja. Kogeneracijske elektrane mogu biti pogonjene na plin, naftu, dizel, ugljen, biomasu i nema ograničenja koliko se takvih zona centraliziranih toplinskih sustava može unijeti u model. Potražnja za toplinskom energijom može se dodatno zadovoljiti postojećim ili novim instalacijama tradicionalnih kotlova. Konačno, potražnja za grijanjem također može biti opskrbljena drugom vezom između energetskog i toplinskog sektora: električnim grijanjem. Tehnologije električnog grijanja uključuju električne kotlove i dizalice topline, uključujući ATW (zrak-voda) i geotermalne dizalice topline. H2RES uzima u obzir COP (koeficijent učinkovitosti) za svaku tehnologiju dizalice topline, koji je funkcija vanjske i tražene unutarnje temperature [27].

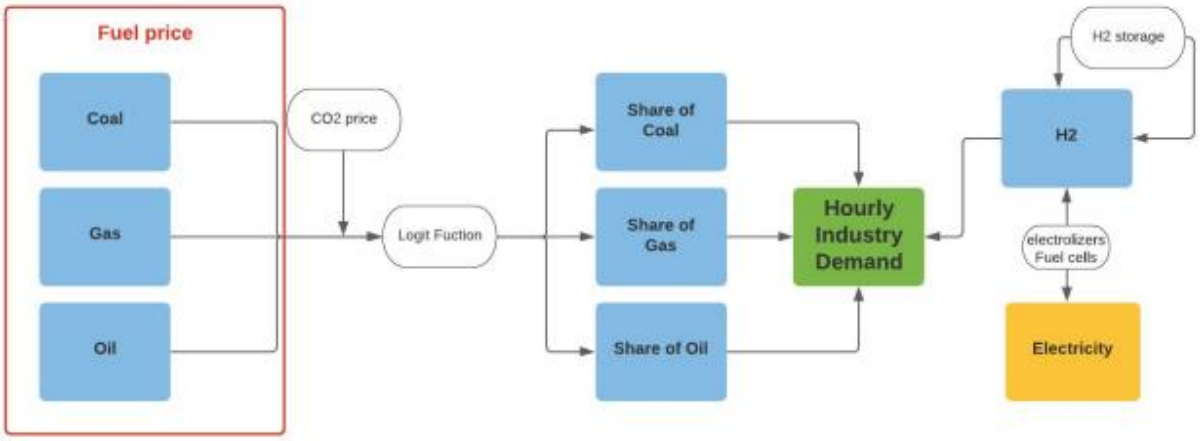
H2RES također u obzir uzima i potražnju koja se ne odnosi na CTS, odnosno zahtjeve individualnog grijanja prostora i tople vode. Ovu individualnu potražnju mogu zadovoljiti postojeće i nove instalacije kotlova na tradicionalna goriva i električno grijanje. I individualna potražnja i zahtjevi CTS-a opisani su satnim krivuljama. Stoga H2RES optimizira opskrbu svih mogućih tehnologija na satnoj razini, dok se veličina novih dodanih kapaciteta za sve tehnologije određuju u svakoj godini razdoblja modeliranja. Svaku tehnologiju karakterizira varijabilni trošak, učinkovitost/COP,

fiksni trošak, pohrana, itd. Potrebe za hlađenjem slijede sličnu strukturu kao i potražnja za toplinskom energijom. Svaka zona CTS-a ima zasebnu krivulju potrošnje, dok postoji samo jedna krivulja za individualno hlađenje prostora. H2RES pretpostavlja da samo tehnologije dizalica topline mogu osigurati rashladnu potražnja u CTS-u i individualnoj potražnji [27]. Shemu toplinskog sektora prikazuje Slika 24.



Slika 24. Shema toplinskog sektora u H2RES-u [26]

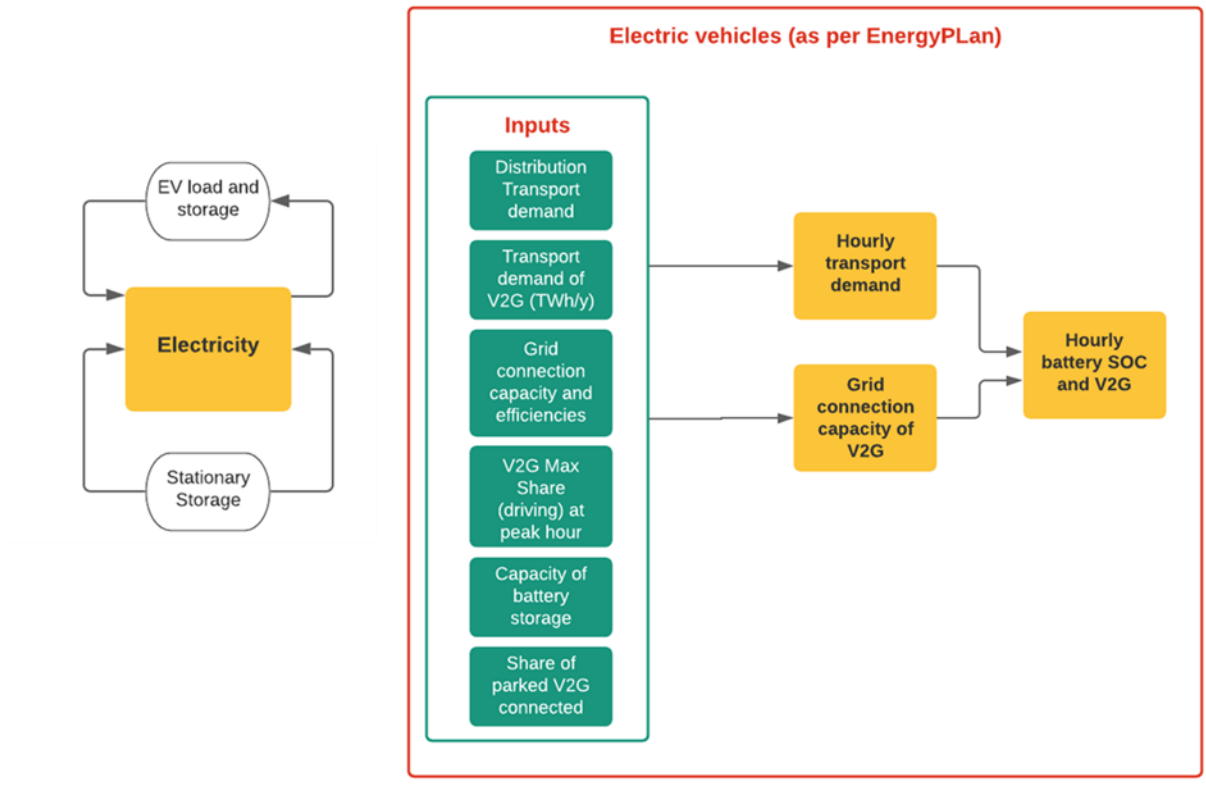
Industrijski sektor: H2RES slijedi logit pristup, široko korišten u literaturi, za modeliranje tržišne konkurencije između različitih izbora opskrbe energetske potražnje u sektoru industrije. Logit je funkcija koja kao ulaz podataka uzima vektor indikatora (u slučaju H2RES-a to su udjeli i troškovi goriva te emisije CO_2) i vraća vektor tržišnih udjela za odgovarajuće alternative izbora. H2RES koristi logit formulaciju za modeliranje konkurencije između različitih goriva u industrijskom sektoru, Slika 25. Razmatra se izbor nafte, prirodnog plina i ugljena, ali izbor se može i proširiti. Trošak ovisi o cijeni goriva i o cijeni emisija CO_2 koja se unaprijed definira. Osim tradicionalnih goriva, koristi se električna energija i vodik za dekarbonizaciju sustava, ali oni ne ulaze u logit funkciju [27].



Slika 25. Shema Industrijskog sektora u H2RES-u [27]

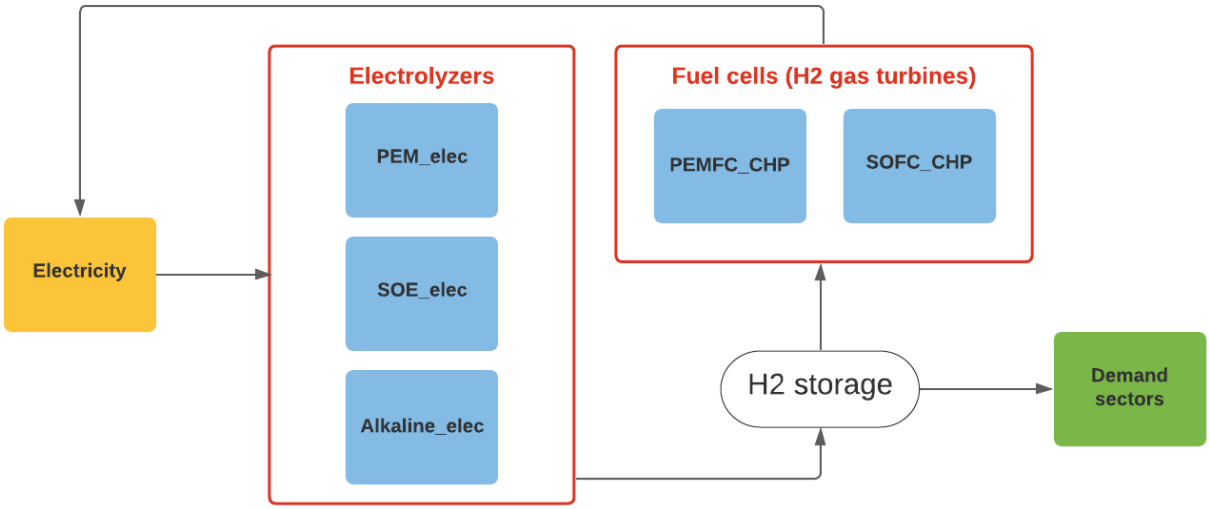
Prometni sektor i pohrana električne energije: Trenutno H2RES slijedi modeliranje električnih vozila po uzoru na model iz EnergyPLAN-a [28]. Potreban je skup jednostavnih parametara, uključujući cijenu V2G-a, broj ukupnih vozila (električnih vozila i vozila na gorivo), potražnja električne energije za električna vozila, informacije o baterijama EV-a (veličina, brzina punjenja) i krivulje dostupnosti (postotak EV-a povezanih na mrežu svakog sata). Korisnici odabiru postotak električnih vozila (od ukupnog broja vozila) u svakoj modeliranoj godini. Te informacije se koriste za određivanje električne energije u mreži, kapacitet i dostupnost skladišta. Stoga prometni sektor pruža promjenjiv kapacitet skladištenja i profile potražnje jer ovise o broju EV-a povezanih na mrežu u svakom razdoblju. Međutim u ovoj verziji modela, ostale vrste prijevoza i vrste pogona vozila nisu modelirani. Shemu prikazuje Slika 26.

Druga mogućnost skladištenja električne energije su stacionarne baterije. H2RES pojednostavljeno, umjesto određenog broja stacionarnih baterija, sve promatra kao jedan raspoloživi spremnik električne energije. Početni kapacitet stacionarnog spremnika određuje korisnik, a H2RES tada optimizira povećanje kapaciteta na godišnjoj razini. Stanje napunjenosti i kapacitet spremnika, ulazi i izlazi električne energije su optimizirani na satnoj razini [27].



Slika 26. Shema spremnika električne energije i električnih vozila u H2RES-u [26]

Power-to-X tehnologije: H2RES sadrži jednu datoteku za unos svih Power-to-X i drugih tehnologija ili komponenti koje omogućuju fleksibilnost energetskog sustava. Dostupne su tehnologije H_2 spremnika, stacionarnog spremnika, dizalica topline, gorivih ćelija i elektrolizatori. Dizalice topline, elektrolizatori i gorive ćelije imaju potkategorije, kao što su ATA i geotermalne dizalice topline, dok se stacionarni i H_2 spremnici smatraju univerzalnim za cijeli sustav bez potkategorija. Ostali parametri koji su potrebni uključuju instalirani kapacitet, maksimalni kapacitet razine ulaganja, varijabilni trošak, intenzitet CO_2, učinkovitost, vijek trajanja, početak dekomisije, konačni kapacitet na kraju životnog vijeka, pokazatelje za primarnu i sekundarnu rezervu, ulazna i izlazna goriva i dostupni kapacitet pohrane [27]. Slika 27. prikazuje veze između potrošnje, proizvodnje i opskrbe vodikom.



Slika 27. Shema sustava vodika u H2RES-u [26]

4.1.2. Ulazni podaci u H2RES-u

Potrebno je unijeti 10 ulaznih datoteka u traženom formatu. Većina datoteka je u .csv, dok je samo datoteka Power-to-X tehnologija u .xlsx Excel formatu. Datoteke prikazuje Tablica 1.

Tablica 1. Potrebne ulazne datoteke za modeliranje sustava H2RES-u [27]

Naziv datoteke	**Opis**
genco_dat	Sve proizvodne jedinice električne energije, njihov proizvodni tip i tehničke karakteristike.
demand_dat	Potražnja električne energije svakog sektora na satnoj razini svih modeliranih godina.
heat_demand_dat	Potražnja toplinske energije u industriji, individualnog grijanja i svake zone CTS-a na satnoj razini svih modeliranih godina.
cooling_demand_dat	Potražnja rashladne energije individualnog potražnje i svake zone CTS-a na satnoj razini svih modeliranih godina.
h2_demand_dat	Potražnja vodika na satnoj razini svih modeliranih godina.

ev_transpload_dat	Opterećenje i postotak povezanih električnih vozila na mrežu na satnoj razini svih modeliranih godina.
fuel_price_dat	Varijabilni trošak svih mogućih tehnologija u H2RES-u na satnoj razini svih modeliranih godina.
avl_factor_dat	Faktor dostupnosti svih tehnologija koje ne mogu odgovorit na zahtjeve mreže na satnoj razini svih modeliranih godina.
inflows_dat	Dotoci vode svih akumulacijskih hidroelektrana na satnoj razini svih modeliranih godina.
import_export	Neto kapacitet prijenosa i uvoz/izvoz na satnoj razini početne godine.

Excel datoteka s Power-to-X tehnologijama, Slika 28., sadrži tehnologije stacionarnih i spremnika vodika, dizalica topline, gorivnih članaka i elektrolizatora. Spremnici vodika i stacionarni spremnik, koji predstavlja litij-ionsku bateriju, smatraju se jedinstvenim tehnologijama, dok se za ostale tehnologije mogu navesti različite potkategorije. Uz tip tehnologije, potrebno je navesti i njihove tehničke karakteristike [27].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	N	O
1	unit_name	cap_mw	max_cap	var_cost	efficiency	CO2Intensity	life_time	decom_start_new	final_life_cap	PrimaryReserve	SecondaryReserve	heat_storage_cap	Tech_type
2	H2_storage_tank	10	100000	10	0.7	0	15	10	0.1	N	N	400	H2 Storage
3	Liion_storage	5	100000	1	0.9	0	15	10	0.1	N	N	10	Stationary Elect Storage
4	ATW_HP	95	100000	1	3.282	0	15	10	0.1	Y	Y	100	Heat pumps
5	geothermal_HP	5	100000	1	4.621	0	15	10	0.1	Y	Y	100	Heat pumps
6	PEMFC_CHP	0	100000	1	0.5	0	15	10	0.1	Y	Y		Fuel cell
7	SOFC_CHP	0	100000	1	0.6	0	15	10	0.1	Y	Y		Fuel cell
8	electric_boiler	826	100000	1	1	0	15	10	0.1	Y	Y	100	Heat pumps
9	PEM_elec	10	100000	1	0.64	0	15	10	0.1	Y	Y		Electrolizer
10	SOEC_elec	10	100000	1	0.8	0	15	10	0.1	Y	Y		Electrolizer
11	Alkaline_EC	10	100000	1	0.72	0	15	10	0.1	Y	Y		Electrolizer

Slika 28. Primjer Excel datoteke za unos podataka o fleksibilnim tehnologijama [27].

U glavnoj datoteci nalaze se četiri skupine parametra prema kojima će se modelirati i optimizirati energetski sustav u traženom razdoblju. Sastoji se od *Glavnih parametra, Parametra strategije, Ostalih parametra i Parametara vezanih za električna vozila i V2G*. Vrijednosti se unose u obliku jedne ili niza brojčanih podataka, bilo kao broj ili postotak.

Glavni parametri su opisani Booleovim parametrima Točno/Netočno prema kojima se odabire osnovni način provedbe simulacije.

Tablica 2. Glavni parametri za definiranje sustava u H2RES-u [27]

Vrsta parametra	**Naziv parametra**	**Vrijednost parametra**	**Opis parametra**
Glavni parametri	rps_inv	True/False	Zahtijevano povećanje OIE
	carbonLimit	True/False	Poštivanje ograničenja emisija CO_2
	res_inv	True/False	Dopušteno ulaganje u OIE
	hydro_storage	True/False	Dopuštena pohrana energije u akumulacijama hidroelektrana
	exports_dat	True/False	Ispis podataka o uvozu i izvozu
	save_csv	True/False	Stvaranje izlaznih .csv rezultata
	ceep_limit	True/False	Poštivanje ograničenja CEEP-a
	NoResToHeatInv	True/False	Nema investicija u dizalice topline
	PrimaryReserve	True/False	Simulacija primare rezerve
	SecondaryReserve	True/False	Simulacija sekundarne rezerve

Parametri strategije predstavljaju ograničenja budućih energetskih sustava kao bi se ostvarili željeni ciljevi energetskih strategija.

Tablica 3. Parametri strategije za definiranje sustava u H2RES-u [27]

Vrsta parametra	**Naziv parametra**	**Vrijednost parametra**	**Opis parametra**
Parametri strategije	rps	Brojčani niz podataka (%)	% OIE u elektroenergetskom sektoru
	CO2_limit	Brojčani niz podataka	Granica CO_2 emisija
	carbon_price	Brojčani niz podataka	Cijena CO_2 emisija
	ceep_parameter	Brojčana vrijednost (%)	Granica CEEP-a

Ostali parametri predstavljaju tehničke karakteristike koje opisuju ponašanje tehnologija kroz vremensko razdoblje. Uz to se određuje neto sadašnja vrijednost, budući da se trošak sustava diskontira na sadašnju vrijednost. Potrebno je navesti i cijenu te povećanje cijene uvoza električne energije.

Tablica 4. Ostali parametri za definiranje sustava u H2RES-u [27]

Vrsta parametra	**Naziv parametra**	**Vrijednost parametra**	**Opis parametra**
Ostali parametri	NPV	Brojčani niz podataka	Neto sadašnja vrijednost diskontirane optimizacije
	TechChangeSolar	Brojčani niz podataka (%)	Promjena fiksnog troška za solarne investicije
	TechChangeWind	Brojčani niz podataka (%)	Promjena fiksnog troška za investicije vjetra
	ThermalDecomInd	Brojčani niz podataka (%)	Dekomisija tehnologija toplinske energije
	HeatPumpDecomInd	Brojčani niz podataka (%)	Dekomisija tehnologija dizalica topline
	StaStoDecomInd	Brojčani niz podataka (%)	Dekomisija tehnologija stacionarnih spremnika
	Import_Price	Brojčani podatak	Cijena uvoza el. energije
	Imp_price_inc	Brojčani podatak	Razina povećanja cijene uvoza el. energije

EV i V2G opći parametri unose se kako bi se definirao kapacitet elektrifikacije transporta. Potrebno je unijeti specifične parametre koji bi opisali karakteristike tehnologija V2G i električnih vozila.

Tablica 5. EV i V2G opći parametri za definiranje sustava u H2RES-u [27]

Vrsta parametra	**Naziv parametra**	**Vrijednost parametra**	**Opis parametra**
EV – V2G opći parametri	V2G_cost	Brojčani podatak	Cijena V2G-a
	num_km	Brojčani podatak	Broj ukupno prijeđenih kilometra u godini
	EV_eff	Brojčani podatak	Učinkovitost električnih vozila
	ev_Demand_year	Brojčani niz podataka	Godišnja potražnja energije od strane EV-a

ev_sto_min	Brojčani podatak	Minimalna razina stanja napunjenosti baterije EV-a
ev_Grid_eff	Brojčani podatak	Učinkovitost prijenosa s EV-a na mrežu
number_of_veh	Brojčani podatak	Ukupni broj svih vozila
average_ch_rate	Brojčani podatak	Prosječna priključna snaga EV-a
average_bat	Brojčani podatak	Prosječna veličina baterije
ev_Grid_P	Brojčani niz podataka	Snaga prijenosa s EV-a na mrežu
ev_stor	Brojčani niz podataka	Pohrana EV-a

4.2. Izrada krivulja

Distribucije potrošnje električne, toplinske i rashladne energije modeliraju se prema postavljenim modelima i pretpostavkama potražnje i razvoja sustava.

4.2.1. Modeliranje potrošnje električne energije

Krivulja potražnje električne energije izradit će se tako da će se normalizirati krivulje opterećenja energetskog sustava od 2011. do 2020. godine koje će opisivati distribuciju satnog opterećenja električne energije svakih 10 godina do 2050. godine. Pretpostavlja se da osnovna godišnja potrošnja električne energije raste za 1% svake godine. Konačna distribucija osnovnih postrojenja za svaki vremenski trenutak računa se prema jednadžbi **(1)**:

$$Q_{i,t} = Q_{total,i} \cdot \frac{r_{i,t}}{\sum_{t=1}^{t=8760} r_{i,t}} \quad \textbf{(1)}$$

Gdje je:

- $Q_{i,t}$ – električno opterećenje sektora i za vremenski trenutak t
- $Q_{total,i}$ – ukupna godišnja potrošnja električne energije za sektora i
- $r_{i,t}$ – normalizirano električno opterećenje za sektor i u vremenskom trenutku t

4.2.2. Modeliranje toplinskog opterećenja

Toplinsko opterećenje se modelira za opću potrošnju, zone s centraliziranim toplinskim sustavom i industriju. Za izračun satne distribucije potrošnje toplinske energije koristi se

metoda stupanj-sat opisana ulaznim podacima vanjske temperature zraka, željenom temperaturom grijane prostorije, temperature iznad ili ispod koje se pretpostavlja rad sustava te pretpostavkama o vremenu rada sustava.

Opća potrošnja predstavlja individualno grijanje te se računa prema jednadžbi **(2)**

$$Q_t = \frac{SS \cdot Q_{t_god}}{\sum_{t=1}^{t=8760} SS} \quad \textbf{(2)}$$

Gdje je:

- Q_t – satno toplinsko opterećenje [MWh]
- Q_{t_god} – ukupna godišnja potrošnja energije [MWh]
- SS – stupanj sat [℃] je definiran kao razlika projektne i vanjske temperature. Za projektnu temperaturu je uzeto 21℃, a vanjska je prosječna temperatura svakog sata u godini.

$$SS = T_{projektna} - T_{vanjska} \quad \textbf{(3)}$$

Pretpostavke koje se uvode su:

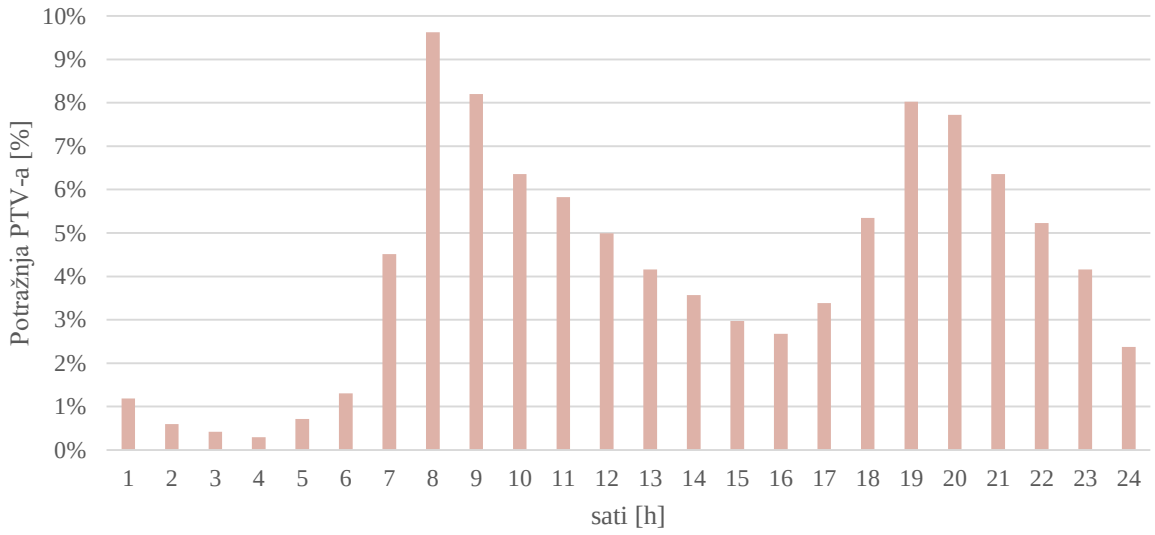
- Sustav radi samo kada je vanjska temperatura manja od 16°C
- Sustav ne radi u periodu od 1. svibnja do 1. listopada
- U periodu od 23 do 6 sati sustav ne radi
- Ukupna potrošnja energije za toplinske potrebe iznosi 80% ukupne potrošnje energije u sektorima kućanstva i usluga

Toplinsko opterećenje centraliziranog toplinskog sustava se računa isto kao i kod individualnog uz male preinake pretpostavka:

- Sustav radi samo kada je vanjska temperatura manja od 16°C
- Sustav ne radi u periodu od 1. svibnja do 1. listopada
- Sustav radi samo od 6 do 23 sata

- Ako je u periodu od 23 do 5 sati vanjska temperatura -15°C ili niža, CTS se pali, ali je projektna temperatura 15°C

Prilikom izrade toplinskog opterećenja individualnog grijanja i CTS-a, distribucija se proširuje s toplinskim opterećenjem potrošne tople vode (PTV) koje iznosi 20% ukupnog toplinskog opterećenja. Slika 29. prikazuje tipičnu raspodjelu PTV-a.



Slika 29. Raspodjela potrošne tople vode tijekom dana [49]

4.2.3. Modeliranje rashladnog opterećenja

Rashladno opterećenje se također računa stupanj-sat metodom u odnosu na razliku vanjske temperature i željene unutarnje temperature. Pretpostavke koje se uvode su:

- Opterećenje se računa samo kada je vanjska temperatura veća od 25°C
- Opterećenja nema u periodu od 1. listopada do 1. svibnja

Opterećenje se računa prema jednadžbi

$$Q_c = \frac{SS_c \cdot Q_{c_god}}{\sum_{t=1}^{t=8760} SS_c} \quad \textbf{(4)}$$

Gdje je:

- Q_c – satno rashladno opterećenje [MWh]
- Q_{c_god} – ukupna godišnja potražnja za rashladnom energijom [MWh]
- SS_c – stupanj sat [°C] je definiran kao razlika vanjske i projektne temperature. Za projektnu temperaturu je uzeto 25°C, a vanjska je prosječna temperatura svakog sata u godini.

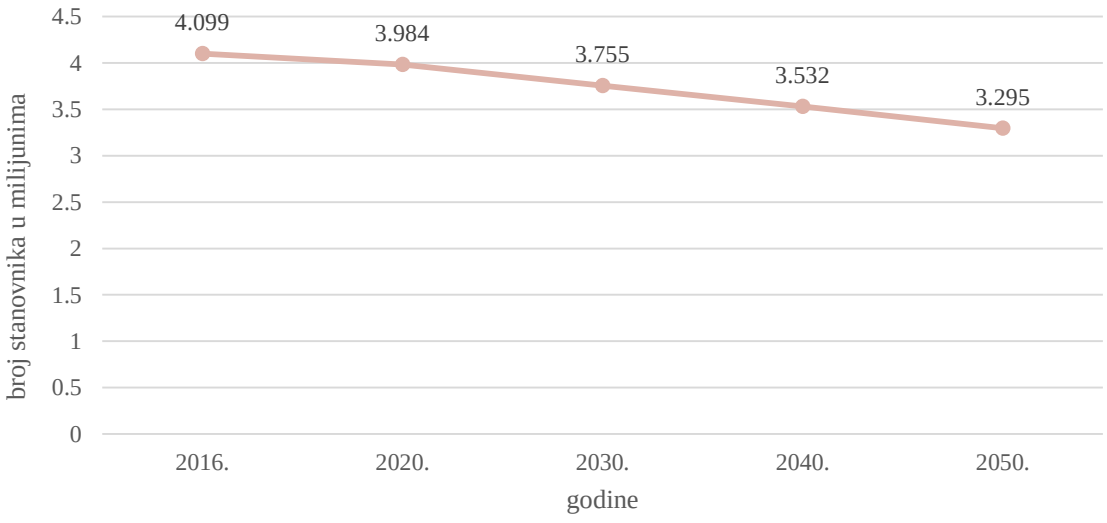
$$SS_c = T_{vanjska} - T_{projektna} \quad \textbf{(5)}$$

5. PRIMJENA NA ENERGETSKOM SEKTORU REPUBLIKE HRVATSKE

Scenarijska analiza provest će se na slučaju Republike Hrvatske. Hrvatska je država u jugoistočnoj Europi, između Slovenije na sjeverozapadu, Mađarske na sjeveru, Srbije na istoku, Crne Gore na jugoistoku te Bosne i Hercegovine na jugu odnosno istoku. Ukupna površina obuhvaća 56 594 km². Glavni grad je Zagreb.

Klimu Hrvatske određuje njezin položaj u sjevernim umjerenim širinama i pripadni vremenski procesi velikih i srednjih razmjera. Najvažniji modifikatori klime na području Hrvatske jesu Jadransko i šire Sredozemno more, orografija Dinarida sa svojim oblikom, nadmorskom visinom i položajem prema prevladavajućem strujanju, otvorenost sjeveroistočnih krajeva prema Panonskoj ravnici, te raznolikost biljnog pokrova. Stoga u Hrvatskoj prevladavaju tri glavna klimatska područja: kontinentalna, planinska i primorska klima [29].

Prema zadnjem Popisu stanovništva iz 2011. godine, broj stanovnika u Republici Hrvatskoj iznosi 4 284 889. Prosječna starost u 2011. godini iznosila je 41,7 godina. Republika Hrvatska već dugi niz godina bilježi vrlo nepovoljne demografske trendove. Demografsko starenje i depopulacija, temeljni su demografski procesi u Republici Hrvatskoj [30].



Slika 30. Projekcija kretanja broja stanovnika Republike Hrvatske do 2050.

Simulirat će se sustav do 2050. godine u kojem će se postaviti određeni ciljevi koji se žele postići u svakoj godini. Ciljevi su određeni prema „Strategiji energetskog razvoja Republike

Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu“ [5] i prema „Strategiji niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu“ [30].

5.1. Povijesni podaci dostupnosti resursa

Povijesni podaci dostupnosti resursa prikupljeni su s Nacionalne Aeronautičke i Svemirske Administracije, engl. National Aeronautics and Space Administration, (NASA) Langley Istraživački Centar (LaRC), Predviđanje Svjetskih energetskih Resursa, engl. Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER), Projekt financiran kroz NASA Projekt Prirodnih Znanosti/Primijenjenih Znanosti [31].

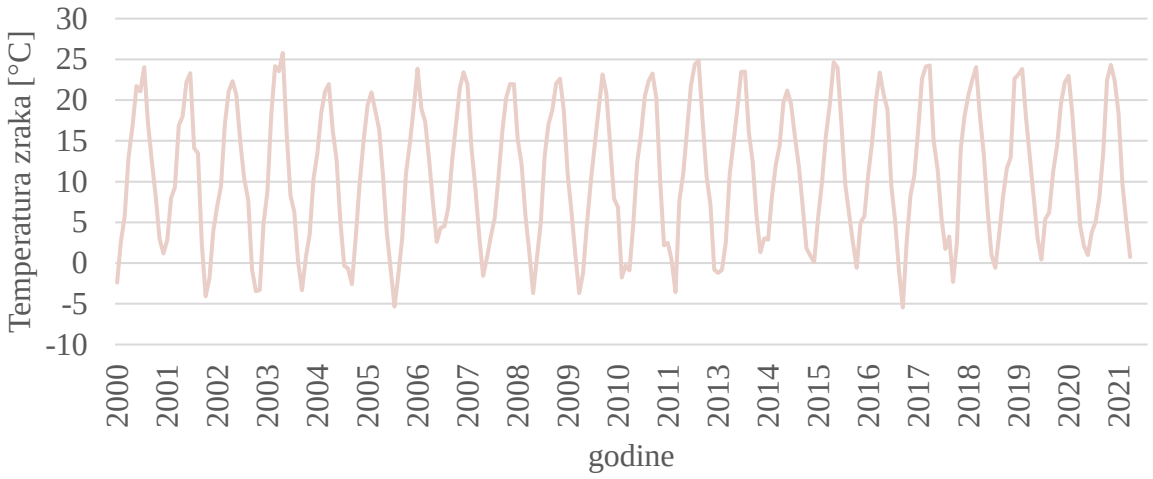
Podaci su prikupljeni za 5 velikih hrvatskih gradova zemljopisno raspoređenih kako bi se obuhvatilo široko područje Republike Hrvatske, kako prikazuje Slika 31. Podaci su prikazani za razdoblje od 2000. do 2020. godine, a prikupljeni su podaci o temperaturi zraka [°C], oborinama [mm], brzini vjetra [m/s] i solarnom zračenju [W/m^2].



Slika 31. Gradovi za koje su prikazani povijesni meteorološki podaci

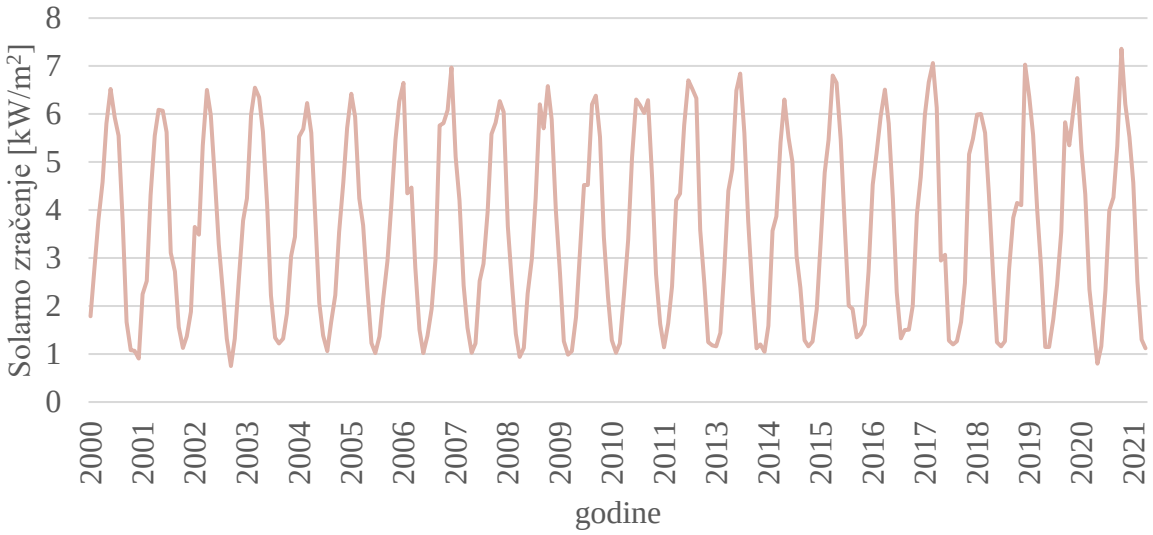
5.1.1. Povijesni podaci za Zagreb

Slika 32. prikazuje temperaturu zraka s prosječnim mjesečnim temperaturama za svaku godinu. Može se zaključiti da je temperatura prilično konstantne razdiobe tijekom promatranog perioda.



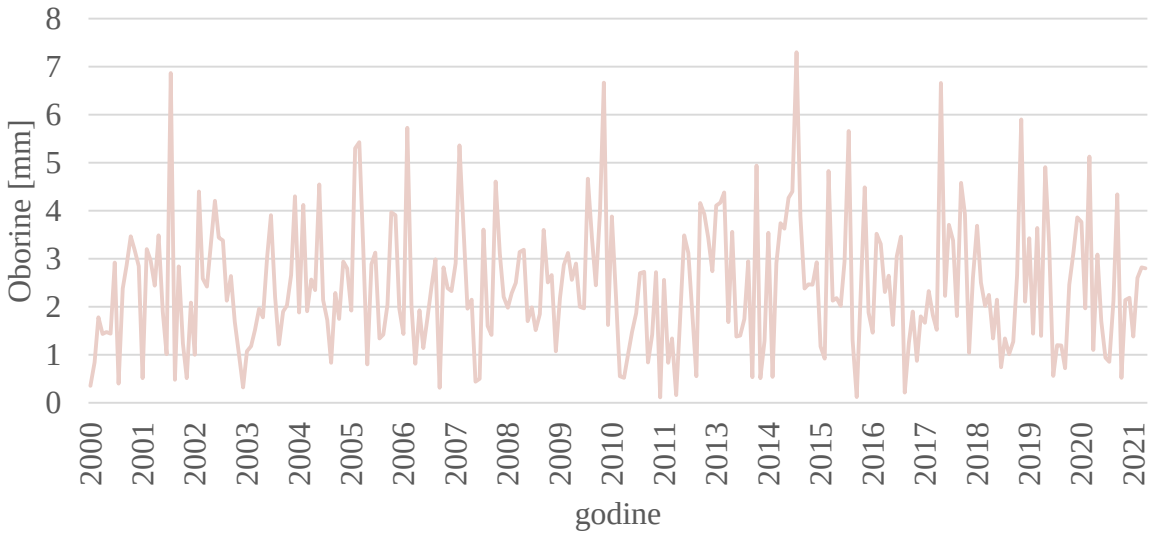
Slika 32. Temperatura zraka u Zagrebu

Solarno zračenje za Zagreb prikazuje Slika 33. Zračenje je prikazano kao prosječno mjesečno zračenje u kW/m^2 za jedan dan kroz promatrani period. U zadnjih 10 godina uočava se manje konstantna razdioba, ali još uvijek bez velikih odstupanja od uobičajenog raspona.



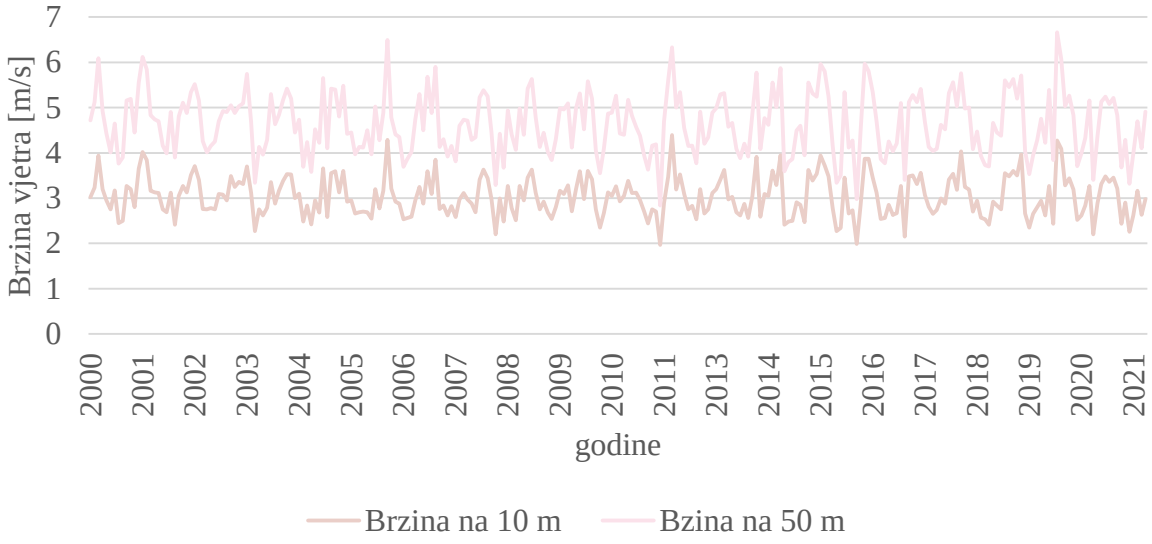
Slika 33. Solarno zračenje u Zagrebu

Prosječne mjesečne oborine u mm za jedan dan kroz promatrano razdoblje prikazuje Slika 34. Uočava se da razdoblja variraju između sušnih i vlažnih godina



Slika 34. Oborine u Zagrebu

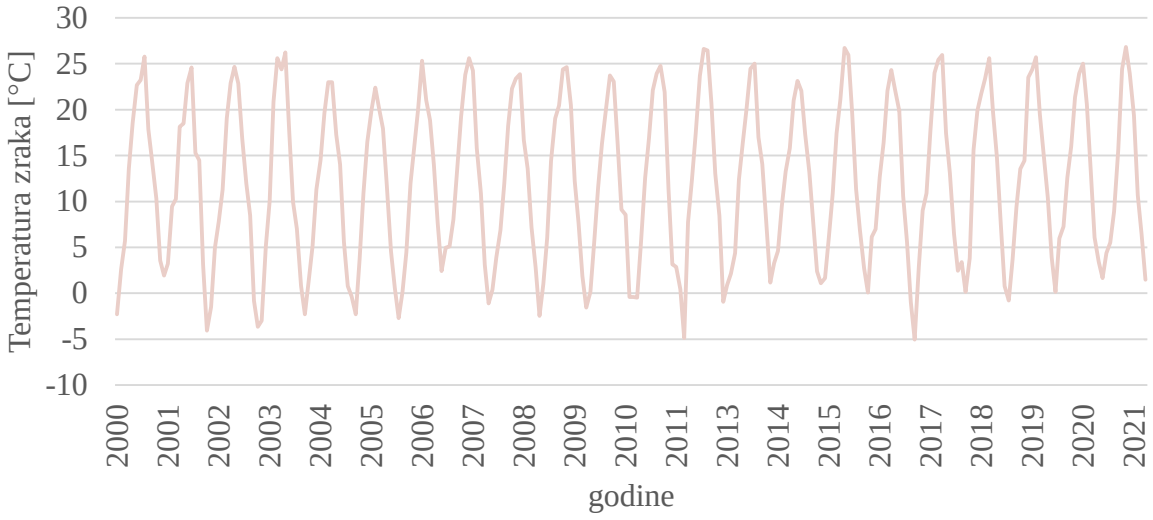
Slika 35. prikazuje prosječne mjesečne brzine vjetra na 10 i 50 metara iznad tla za područje grada Zagreba. Razdioba se većinom zadržava u određenom rasponu.



Slika 35. Brzine vjetra u Zagrebu

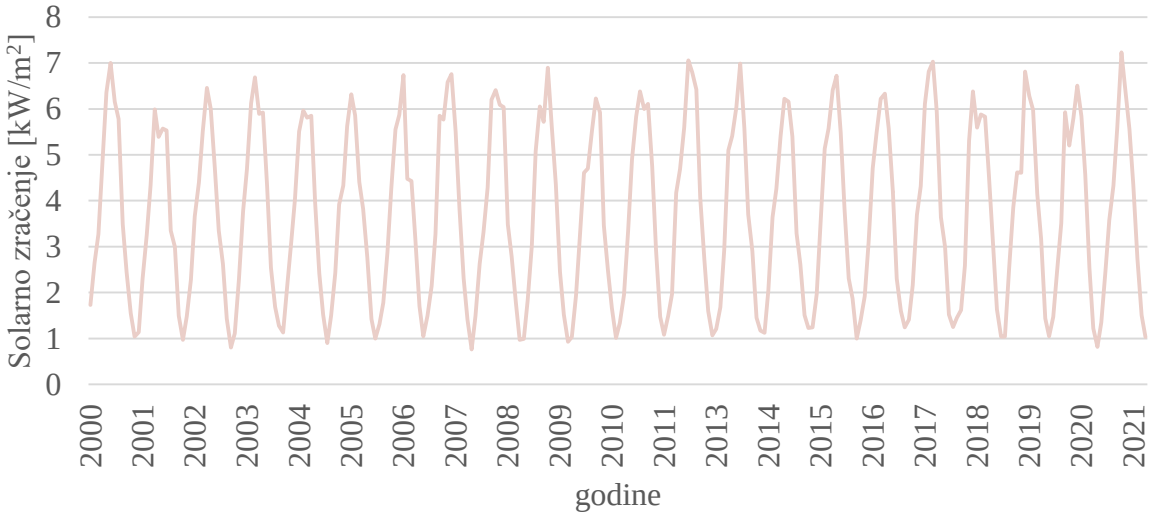
5.1.2. Povijesni podaci za Osijek

Slika 36. prikazuje prosječnu mjesečnu temperaturu zraka za svaku godinu. Može se zaključiti da je temperatura prilično konstantne razdiobe tijekom promatranog perioda s ponekim izraženijim hladnijim razdobljima.



Slika 36. Temperatura zraka u Osijeku

Slika 37. prikazuje prosječno mjesečno zračenje u kW/m^2 za jedan dan na području Osijeka koje je uglavnom konstantnog raspona.



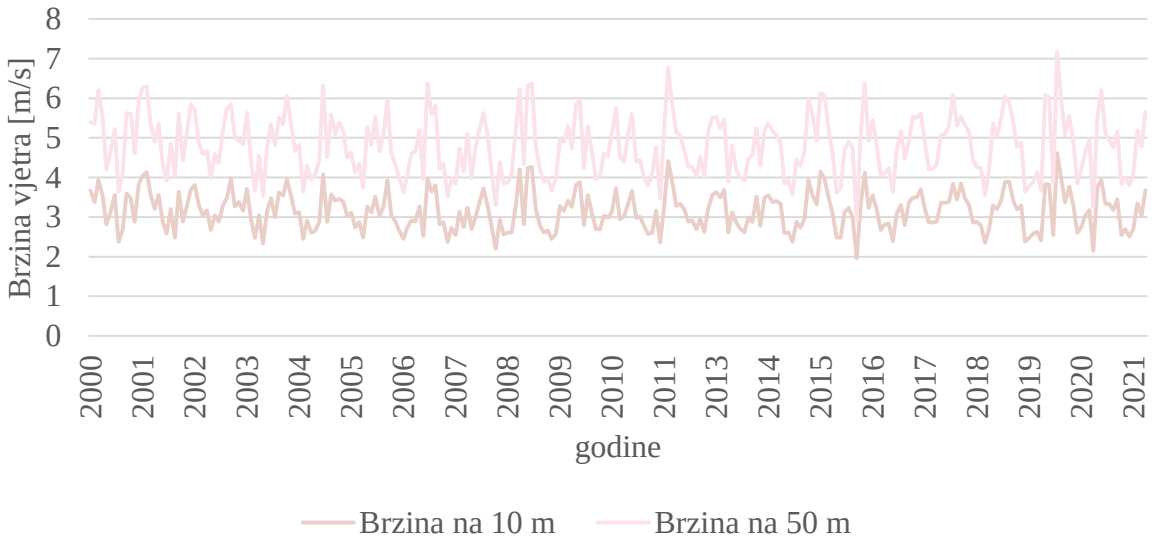
Slika 37. Solarno zračenje u Osijeku

Mjesečni prosjek dnevnih oborina u mm za područje grada Osijeka prikazuje Slika 38. Može se uočiti kako je distribucija oborina u padu uz još uvijek izražena suha i vlažna razdoblja.



Slika 38. Oborine u Osijeku

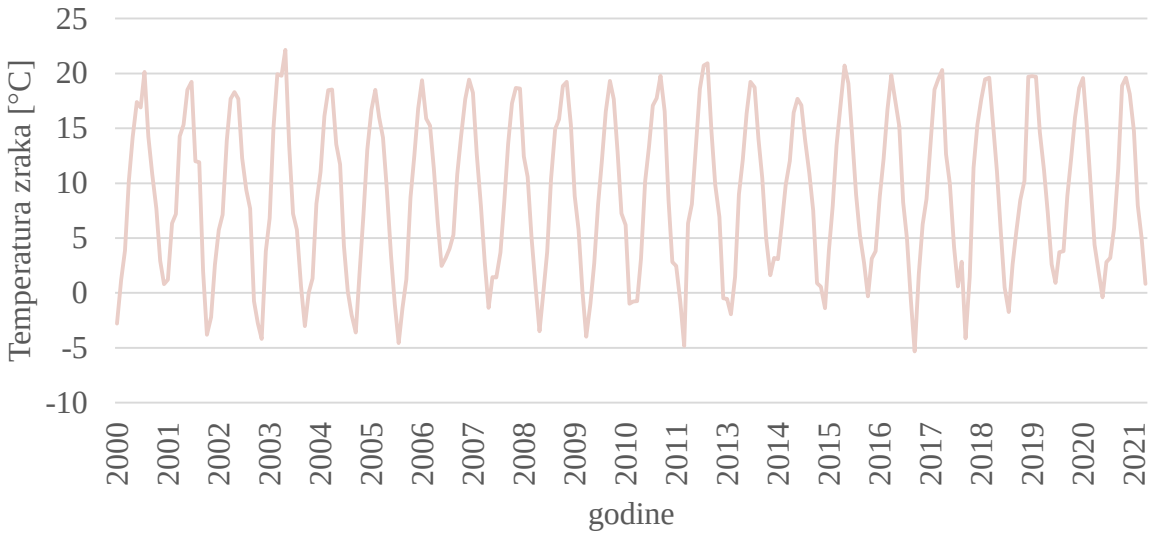
Prosječna mjesečna brzina vjetra na 10 i 50 metara iznad tla na području Osijeka prikazuje Slika 39.



Slika 39. Brzina vjetra u Osijeku

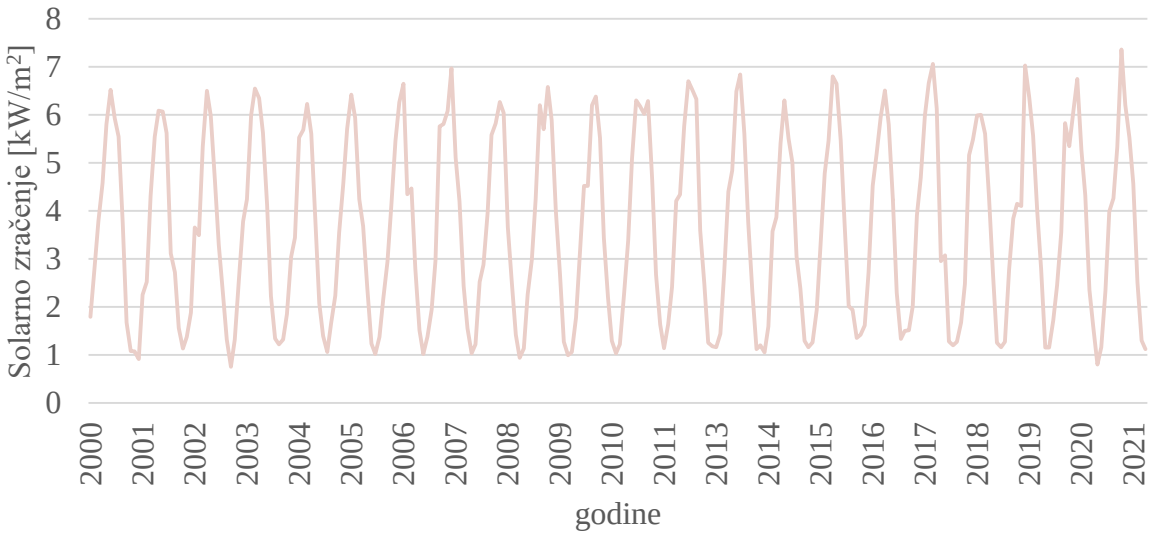
5.1.3. Povijesni podaci za Rijeku

Slika 40. pokazuje da prosječna mjesečna temperatura ima prilično konstantne maksimalne vrijednosti, dok hladniji mjeseci znaju varirati između toplijih i hladnijih godina.



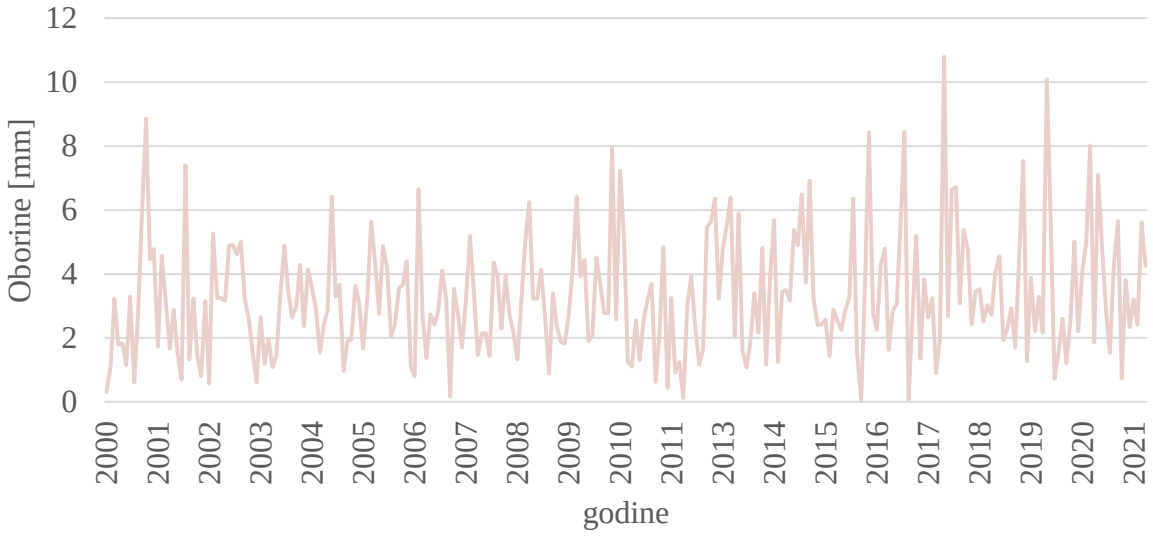
Slika 40. Temperatura zraka u Rijeci

Prosječno mjesečno solarno zračenje jednog dana u zadnjih 10 godina ima više vrijednosti, ali uz izraženiju oscilaciju između godina kao što prikazuje Slika 41.



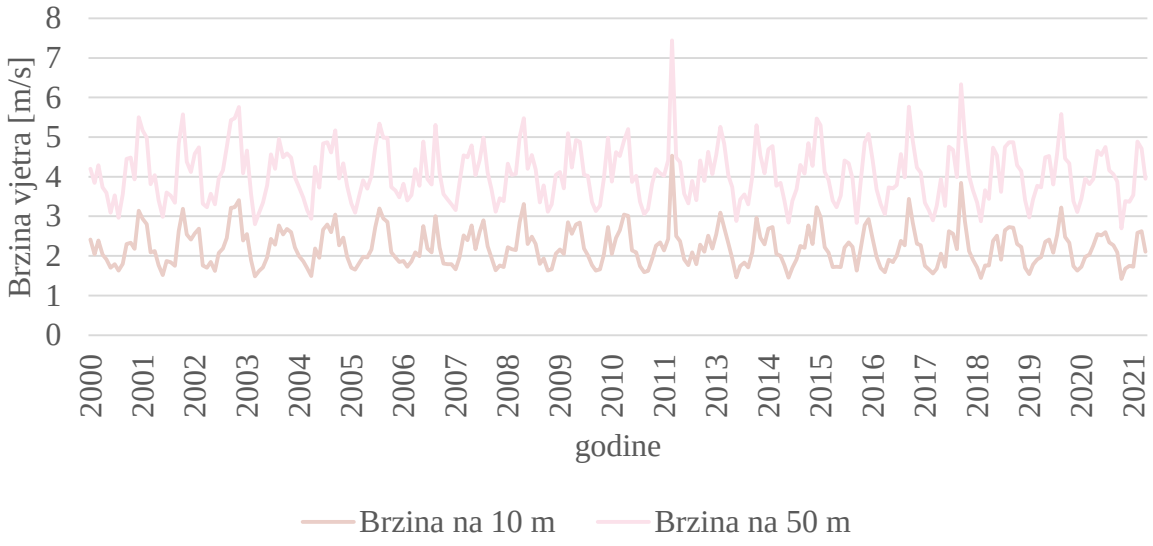
Slika 41. Solarno zračenje u Rijeci

Prosječne mjesečne oborine jednog dana u mm na području Rijeke u posljednjim godinama imaju veće oscilacije između izrazito sušnih i vlažnih razdoblja. Slika 42. prikazuje distribuciju od 2000. do 2021. godine.



Slika 42. Oborine u Rijeci

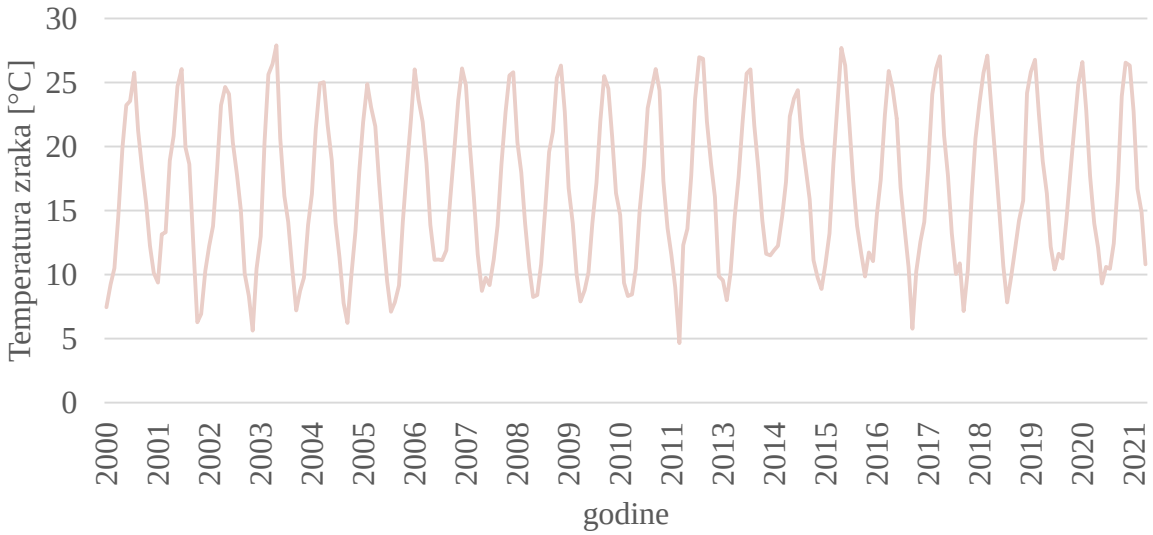
Brzinu vjetra na 10 i 50 m iznad tla prikazuje Slika 43. Brzina vjetra na 50 metara ima izraženije odstupanje od uobičajenog raspona nego brzina na 10 metara.



Slika 43. Brzina vjetra u Rijeci

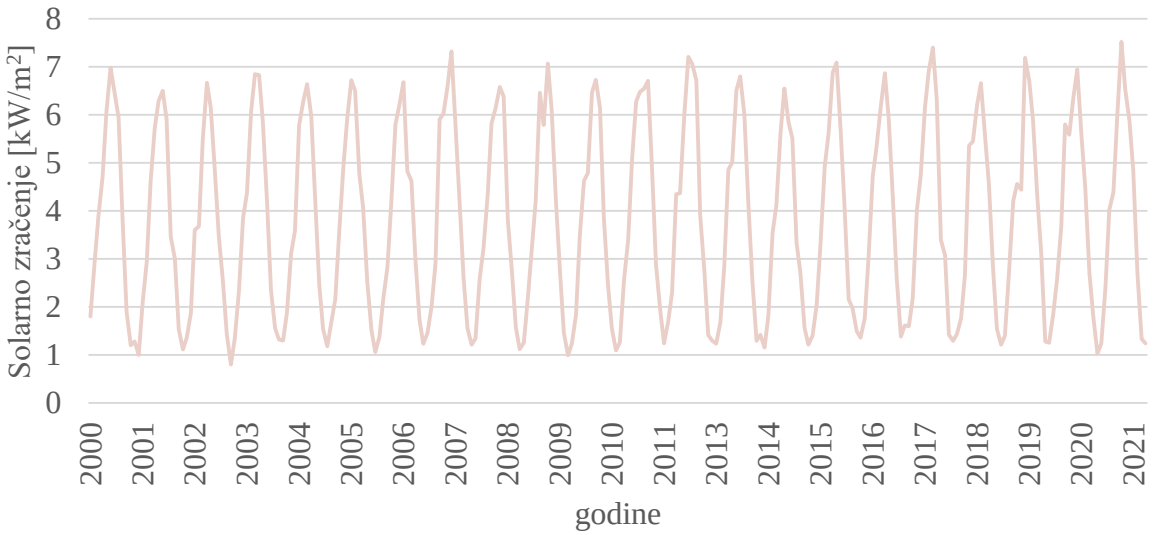
5.1.4. Povijesni podaci za Zadar

Temperatura zraka na području Zadra je u porastu, kako u hladnijim mjesecima tako i u toplijim kako prikazuje Slika 44.



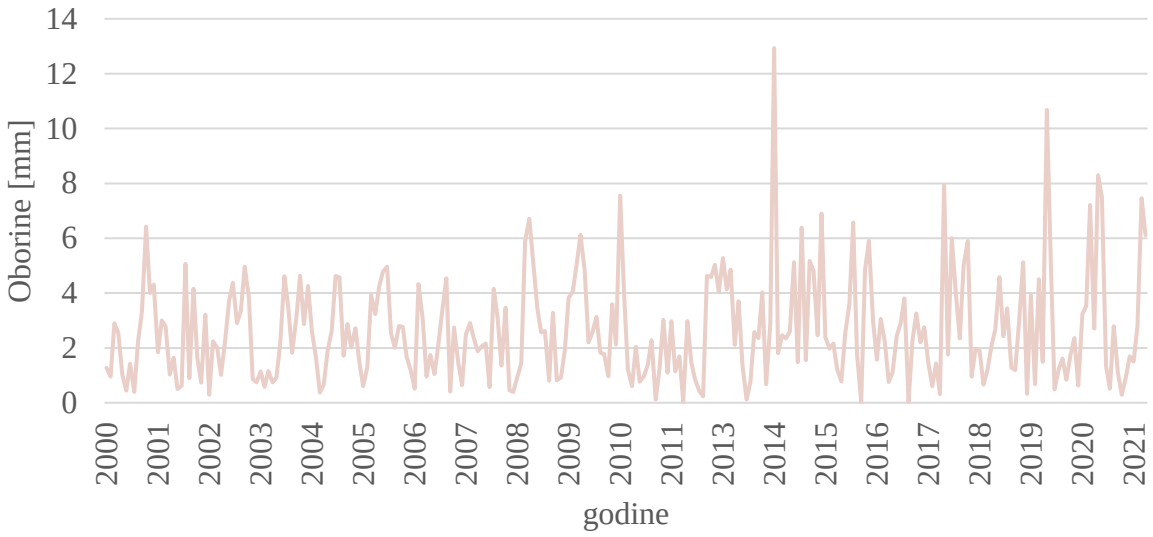
Slika 44. Temperatura zraka u Zadru

Slika 45. prikazuje prosječno mjesečno solarno zračenje jednog dana koje je u porastu s izraženijim oscilacijama između godina.



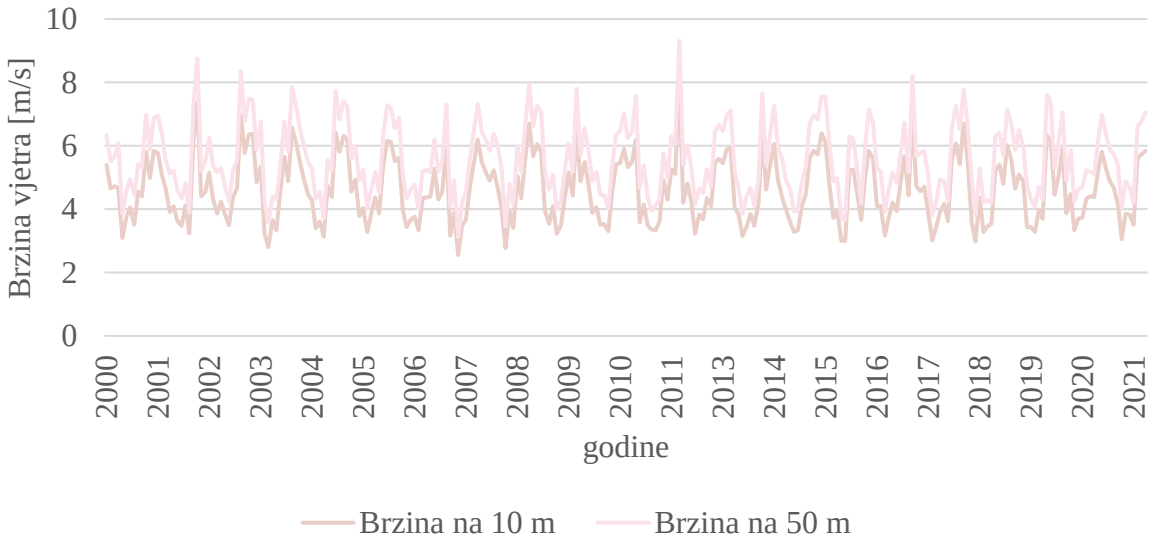
Slika 45. Solarno zračenje u Zadru

Mjesečni prosjek dnevnih oborina u mm za područje grada Zadra prikazuje Slika 46. Može se uočiti kako je distribucija oborina u porastu uz sve veće oscilacije između godina.



Slika 46. Oborine u Zadru

Brzina vjetra na 10 i 50 metara iznad tla održava prilično konstantnu razdiobu u promatranom razdoblju kao što prikazuje Slika 47.



Slika 47. Brzina vjetra u Zadru

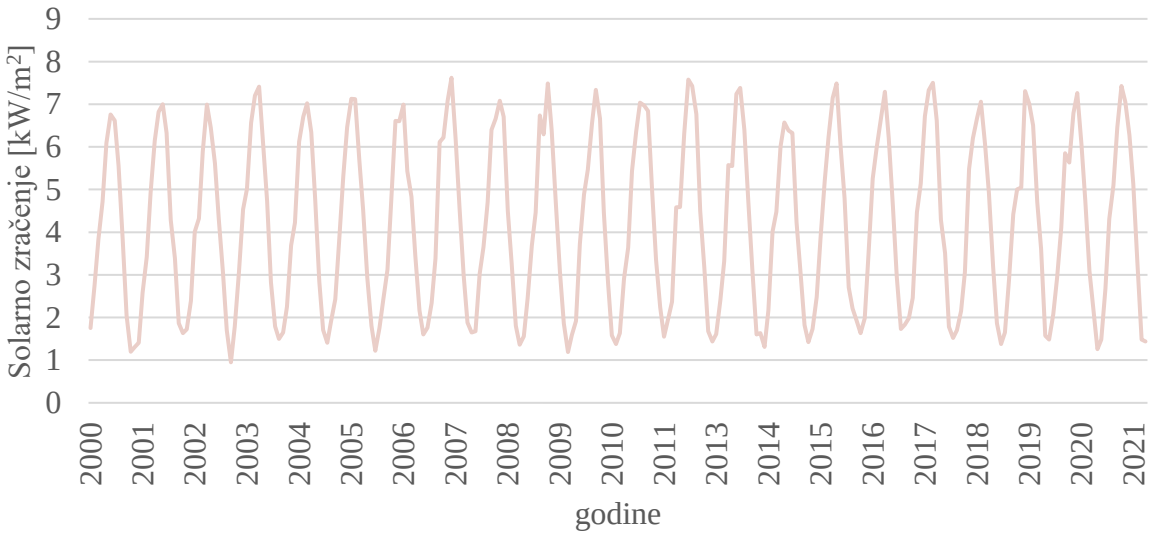
5.1.5. Povijesni podaci za Split

Slika 48. prikazuje temperaturu zraka s prosječnim mjesečnim temperaturama za svaku godinu. Može se zaključiti da je temperatura u porastu sa sve toplijim zimama.



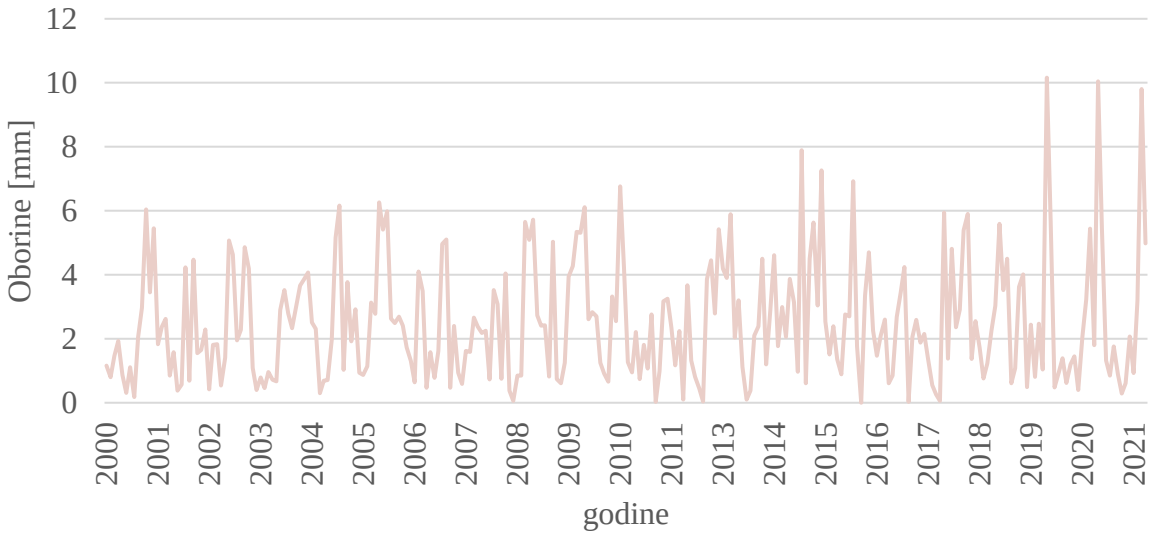
Slika 48. Temperatura zraka u Splitu

Prosječno mjesečno solarno zračenje jednog dana u zadnjih 10 godina je u porastu kao što prikazuje Slika 49.



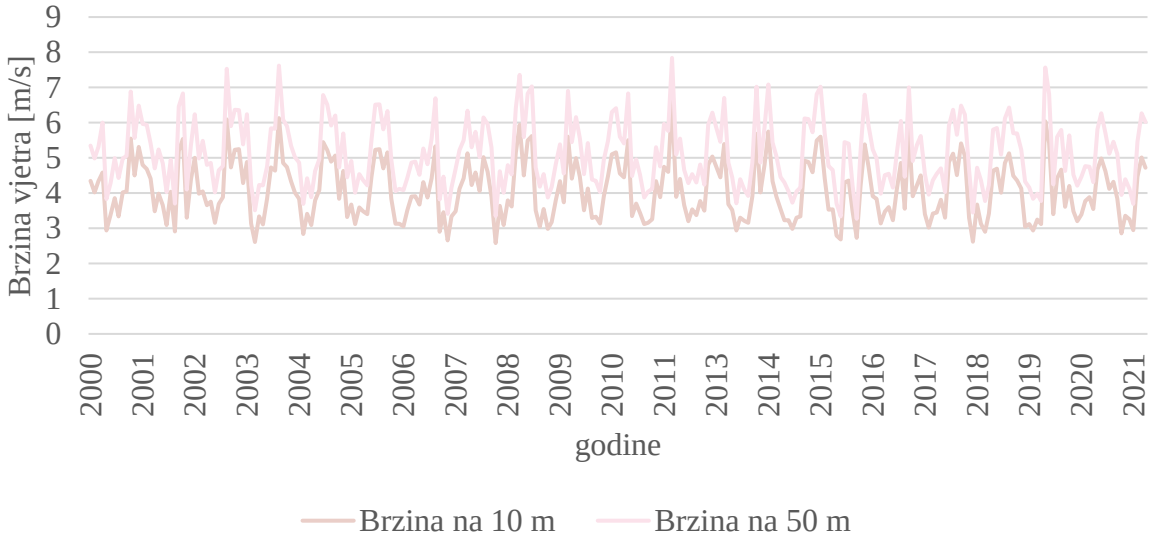
Slika 49. Solarno zračenje u Splitu

Mjesečni prosjek dnevnih oborina u mm za područje grada Zadra prikazuje Slika 50. Može se uočiti kako je distribucija oborina u porastu uz sve veće razlike između mjeseca u godini.



Slika 50. Oborine u Splitu

Brzina vjetra na 10 i 50 metara iznad tla na području grada Splita održava prilično konstantnu razdiobu u promatranom razdoblju kao što prikazuje Slika 51.



Slika 51. Brzina vjetra u Splitu

5.2. Buduće prognoze dostupnosti resursa

Europska platforma za prilagodbu klimatskim promjenama, engl „The European Climate Adaptation Platform“, Climate-ADAPT je partnerstvo između Europske komisije i Europske agencije za okoliš. Cilj Climate-ADAPT-a je podrška Europi u prilagođavanju klimatskim promjenama pomažući korisnicima u pristupu i dijeljenju podatka i informacija o [32]:

- Očekivanim klimatskim promjenama u Europi
- Sadašnjoj i budućoj ranjivosti regija i sektora
- Europskim, nacionalnim i transnacionalnim strategijama i postupcima prilagodbe
- Studijama slučaja prilagodbe i potencijalne mogućnosti prilagodbe
- Alatima koji podržavaju planiranje prilagodba.

U sklopu Climate-ADAPT suradnje razvijene su i nacionalne procjene utjecaja klimatskih promjena i ranjivosti sektora, uključujući i energetiku. Sukladno tome, projektom „Jačanje kapaciteta Ministarstva zaštite okoliša i energetike za prilagodbu klimatskim promjenama te priprema Nacrta Strategije prilagodbe klimatskim promjenama“ izrađen je dokument [33] klimatskog modeliranja za područje Republike Hrvatske upotrebom atmosferskog klimatskog modela RegCM (engl Regional Climate Model). Model održava i usavršava odjel za fiziku Zemljinog sustava pri Međunarodnom centru za teorijsku fiziku u Trstu, Italija.

Da bi se ustvrdilo u kojoj mjeri klimatski model uspješno reproducira globalnu ili regionalnu (lokalnu) klimu, numeričke se jednadžbe moraju prvo integrirati za neko prošlo vremensko razdoblje za koje postoje izmjereni klimatski podaci, a onda klimatski model simulira stvarnu klimu. Sadašnja (“povijesna”) klima pokriva razdoblje od 1971.-2000. te označava referentno klimatsko razdoblje ili referentnu klimu. Promjena klimatskih varijabli u budućoj klimi u odnosu na referentnu klimu prikazana je i diskutirana za dva vremenska razdoblja: 2011.-2040. (neposredna budućnost) i 2041.-2070. (klima sredine 21. stoljeća). Klimatske promjene definirane su kao razlike vrijednosti klimatskih varijabli između razdoblja [33]. U sljedećim poglavljima dat će se pregled dostupnosti resursa dobivenih modeliranjem iz dokumenta [33], bitnim za energetski sektor Republike Hrvatske u budućnosti.

Klimatske promjene prikazane su i diskutirane po sezonama (zima, proljeće, ljeto, jesen). U mnogim sektorima prilagodba klimatskim promjenama ovisit će o sezonskim varijacijama. Sezone su definirane prema klimatološkom, a ne prema astronomskom obrascu: zima (prosinac, siječanj, veljača), proljeće (ožujak, travanj, svibanj), ljeto (lipanj, srpanj, kolovoz) i jesen (rujan, listopad, studeni).

5.2.1. Temperatura zraka

U budućoj klimi do 2040. očekuje se u čitavoj Hrvatskoj gotovo jednoličan porast temperature od 1 do 1,5 °C. Trend porasta temperature nastavlja se i do 2070. Porast je i dalje jednoličan i iznosi između 1,5 i 2 °C. Nešto malo toplije moglo bi biti samo na krajnjem zapadu zemlje, duž zapadne obale Istre [33].

Sezonske vrijednosti do 2040. pokazuju kako je porast temperature gotovo identičan zimi i ljeti – između 1,1 i 1,2 °C. U proljeće u većem dijelu Hrvatske prevladava nešto manji porast: od 0,7 °C na otocima Dalmacije do malo više od 1 °C u sjeverozapadnoj Hrvatskoj. Jesenski porast temperature je između 0,9 °C u istočnoj Slavoniji do oko 1,2 °C na Jadranu, a u zapadnoj Istri i do 1,4 °C. U razdoblju do 2070. najveći porast srednje temperature zraka, do 2,2 °C, očekuje se na Jadranu u ljeto i jesen. Nešto manji porast mogao bi biti ljeti u najsjevernijim krajevima i Slavoniji, a u jesen u većem dijelu Hrvatske. U zimi i proljeće je prostorna razdioba porasta temperature obrnuta od one u ljeto i jesen: porast je najmanji na Jadranu, a veći prema unutrašnjosti. U proljeće je porast srednje temperature od 1,4 do 1,6 °C na Jadranu i postupno raste do 1,9 °C u sjevernim krajevima [33].

5.2.2. Oborine

U budućoj klimi do 2040. za veći dio Hrvatske projicirano je vrlo malo smanjenje količine oborina (do najviše 30-ak mm), tako da ono neće imati značajniji utjecaj na godišnju količinu oborina. U sjeverozapadnoj Hrvatskoj signal promjene je suprotnog predznaka, tj. predviđa se manji porast godišnje količine oborina, također ne više od 50-ak mm. Do 2070. trend smanjenja srednje godišnje količine oborina proširit će se gotovo na cijelu zemlju, osim na najsjevernije i najzapadnije krajeve. Međutim, osim što će zahvaćati veći dio Hrvatske, valja naglasiti da to smanjenje količine oborine neće biti izraženo. Najveće smanjenje očekuje se u gorskim predjelima pa do zaleđa Dalmacije uz granicu s Bosnom i Hercegovinom (oko 40-ak mm), te u najjužnijim kopnenim predjelima (oko 70 mm) [33].

U budućoj klimi od 2011.-2040. na sezonskoj razini projicirana promjena ukupne količine oborine ima različit predznak: dok se u zimi i za veći dio Hrvatske u proljeće očekuje manji porast količine oborine, u ljeto i u jesen prevladavat će smanjenje količine oborina u čitavoj zemlji. Porast količine oborina je u zimi manji od 20 mm; u proljeće je porast u zapadnim predjelima još i manji, dok je smanjenje količine oborina u Slavoniji i južnim predjelima zanemarivo. Najveće ljetno smanjene količine oborina predviđeno je u južnoj Lici (do oko 20 mm), predjelu u kojem inače ljeti padne najveća količina oborina (180-270 mm). Najveće projicirano smanjenje ukupne količine oborina u jesen je oko 20 mm u Gorskom Kotaru i sjevernom dijelu Like, što čini oko 5% oborina u toj sezoni. Na krajnjem jugu smanjenje je između 20 i 40 mm, što je oko 5% manje u odnosu na simuliranu količinu oborina u referentnoj klimi. U razdoblju do 2070. godine očekuje se u svim sezonama, osim u zimi, smanjenje količine oborina. Najveće smanjenje (do maksimalno 45 mm) bit će u proljeće u južnoj Dalmaciji, dok će do najvećeg povećanja količine oborina, oko 30 mm, doći u jesen na otocima srednje Dalmacije [33].

5.2.3. Evapotranspiracija

U budućoj klimi do 2040. godine, projicirano je povećanje evapotranspiracije u obje sezone. U proljeće povećanje je do oko 10 mm u većem dijelu zemlje i nešto više u zaleđu Dalmacije. Slične iznose povećane ukupne evapotranspiracije nalazimo i u ljeto u južnom dijelu Slavonije, zapadne Hrvatske, gorskim predjelima i Dalmaciji. Jače povećanje evapotranspiracije je ograničeno na otoke i zapadni dio Istre. U većem dijelu sjeverne Hrvatske neće doći do promjene ukupne ljetne evapotranspiracije u neposrednoj budućnosti. Porast evapotranspiracije nastavlja se u proljeće i u razdoblju 2041.-2070., ali neće prelaziti 20 mm. U ljetnim mjesecima, očekuje se da se evapotranspiracija neće mijenjati u odnosu na referentnu klimu, 1971.-2000. Samo na Jadranu očekuje se povećanje evaporacije [33].

5.2.4. Brzina vjetra na 10 m visine

Do 2040. ne očekuje se promjena srednje godišnje brzine vjetra. Sličan rezultat je i za razdoblje od 2041.-2070. kada se također ne očekuje bitna promjena godišnje brzine vjetra na 10 m. Jedino je blagi porast od nešto više od 0,1 m/s predviđen u Istri i otvorenom moru sjevernog i srednjeg Jadrana [33].

Prema sezonskim vrijednostima do 2040. srednja brzina vjetra neće se mijenjati u zimi i proljeće, ali će nešto porasti u ljeto na Jadranu. Porast prosječne brzine vjetra osobito je izražen u jesen na sjevernom Jadranu (do oko 0,5 m/s) što predstavlja promjenu od oko 20-25% u odnosu na referentno razdoblje. Mali porast brzine vjetra projiciran je u jesen u Dalmaciji i gorskim predjelima, dok se u ostatku Hrvatske ne očekuje promjena srednje brzine vjetra. U razdoblju do 2070., ne očekuje se promjena srednje brzine vjetra u zimi i u proljeće, osim blagog smanjenja u dijelu sjeverne i u istočnoj Hrvatskoj tijekom zime. U ljeto se nastavlja trend jačanja brzine vjetra na Jadranu, slično kao u razdoblju do 2040. Nešto izraženiji porast srednje brzine vjetra očekuje se u jesen na čitavom Jadranu i u priobalnim područjima, s maksimumom od 0,4 do 0,5 m/s duž zapadne obale Istre [33].

5.2.5. Sunčevo zračenje

U razdoblju od 2011.-2040. očekuje se vrlo mali porast ozračenja (dozračene sunčeve energije) – između 0,5 do 1 W/m^2, a u Istri ne bi došlo do promjene. Porast ozračenja ulazne sunčane energije nastavlja se i u razdoblju 2041.-2070. U većini sjevernih i zapadnih krajeva očekuje se porast od 2-3 W/m^2, a u gorskoj i južnoj Hrvatskoj porast bi bio veći od 3 W/m^2 [33].

Promjena ozračenja ulazne sunčane energije u razdoblju 2011.-2040. nije u istom smjeru u svim sezonama. Dok je zimi u čitavoj Hrvatskoj, a u proljeće u zapadnim krajevima projicirano smanjenje ozračenja sunčane energije (negativne vrijednosti), u ljeto i jesen, te u sjevernim krajevima u proljeće, predviđa se porast vrijednosti u odnosu na referentno razdoblje. Zimsko smanjenje ozračenja najmanje je na južnim otocima (-0,5 W/m^2), a najveće u sjevernoj Hrvatskoj oko -2 W/m^2 . U odnosu na referentno razdoblje ovo smanjenje u sjevernoj Hrvatskoj iznosi oko 4-5%, a na Jadranu oko 2% (u sjevernom dijelu Istre i malo više). U proljeće se ozračenje sunčane energije u razdoblju do 2040. ne bi mijenjao na južnom Jadranu i sjeverozapadnoj Hrvatskoj. U ostalim krajevima sjeverne Hrvatske došlo bi do povećanja, maksimalno oko 1 W/m^2 , a na ostatku Jadrana i u gorskoj Hrvatskoj ozračenje bi se smanjilo za nešto više od 1 W/m^2. U ljeto i jesen projiciran je porast ozračenja ulazne sunčeve energije u čitavoj Hrvatskoj, u prosjeku između 1 i malo više od 4 W/m^2 . Na Jadranu je porast ljeti manji nego u jesen, dok je u sjevernoj Hrvatskoj situacija obrnuta – ljetni porast je veći nego jesenski. S obzirom da su ljetne vrijednosti ozračenja sunčane energije vrlo visoke, projicirani porast je relativno zanemariv. U jesen porast iznosi tek oko 2-4%. Za razliku od razdoblja do 2040. sada se u svim sezonama, osim u zimi, u razdoblju 2041.-2070. očekuje povećanje ozračenja ulazne sunčane energije u srednjaku ansambla. Porast je najveći u ljeto (8-12 W/m^2)

u gorskoj i središnjoj Hrvatskoj, a najmanji u srednjoj Dalmaciji. U proljeće i jesen porast je maksimalno do malo više od 4 W/m^2, što je relativno malo povećanje. Najveće smanjenje ozračenja ulazne sunčeve energije, u iznosu do 3 W/m^2 , nalazimo zimi u sjevernoj Hrvatskoj [33].

5.2.6. Ekstremni vremenski uvjeti

Ekstremni vremenski uvjeti analizirani su i prikazani za referentnu klimu kao prosječna učestalost, odnosno kao prosječan "broj dana" neke (ekstremne) pojave u jednoj godini, te kao promjena prosječnog "broja dana" u budućim klimatološkim razdobljima u odnosu na referentno razdoblje [33].

Broj dana kad je minimalna temperatura manja od -10 °C (ledeni dani). Ova varijabla analizirana je samo za zimsko razdoblje. U budućoj klimi, do 2040., očekuje se smanjenje broja dana s minimalnom temperaturom manjom od -10 °C. Ono bi iznosilo manje od 5 dana u sjevernim i istočnim predjelima i 5-7 dana u zapadnim i gorskim predjelima. U razdoblju 2041.-2070. očekuje se daljnje smanjenje broja dana s minimalnom temperaturom manjom od -10 °C. U većem dijelu unutrašnjosti broj takvih dana bio bi manji za 7 do 10 [33].

Broj dana kad je minimalna temperatura veća ili jednaka 20 °C (tople noći). Ova varijabla analizirana je samo za ljetnu sezonu. U budućoj klimi do 2040. očekuje se porast broja dana s toplim noćima. Najveći porast projiciran je za područje Jadrana – između 8 i 12 dana na otocima, te 4 i 6 dana u zaleđu. I u nizinskim krajevima istočne Hrvatske porast broja dana s toplim noćima (6-8) bit će gotovo jednak kao u nekim dijelovima primorja. Do 2070. očekuje se daljnji porast broja dana s toplim noćima. Prostorna razdioba tog porasta gotovo je identična onoj za prethodno klimatološko razdoblje, ali je amplituda porasta broja dana sada osjetno veća. Tako se očekuje porast između 16 i 20 dana na otocima, te nešto manje u ostalim primorskim krajevima. U najistočnijim dijelovima porast bi mogao biti i do više od 12 dana [33].

Broj dana kad je maksimalna temperatura veća od 30 °C (vrući dani). Ova varijabla također je analizirana samo za ljetnu sezonu. Do 2040. očekuje se porast broja vrućih dana. U većem dijelu Hrvatske to povećanje bilo bi između 6 i 8 dana, te više od 8 dana

u istočnoj Hrvatskoj te ponegdje na Jadranu. I u gorskim predjelima bi porast vrućih dana u budućoj klimi bio jednak kao i u većem dijelu zemlje. Porast broja vrućih dana nastavio bi se i u razdoblju 2041.-2070. Ovaj porast u čitavoj Hrvatskoj doseže više od 12 dana što bi u nekim krajevima odgovaralo udvostručenju broja vrućih dana u odnosu na referentno razdoblje [33].

Broj dana kad je maksimalni vjetar veći od 20 m/s (72 km/h). Ovaj događaj karakterističan je samo za zimsko razdoblje. Promjene u budućoj klimi uglavnom su ograničene na otvoreno more, ali bi mogle donekle utjecati i na naše vanjske otoke. U budućoj klimi očekuje se smanjenje broja dana s maksimalnim vjetrom većim od 20 m/s. Ovo smanjenje najveće je na otvorenom moru sjevernog Jadrana (do 7 dana u 10 godina) i podjednako je u oba buduća klimatska razdoblja. Smanjenje broja dana (do najviše 4 dana u 10 godina) moglo bi zahvatiti obalu Istre, kvarnerske otoke, te dijelove sjeverne Dalmacije [33].

Broj kišnih razdoblja. Do 2040. očekivani broj kišnih razdoblja će se u središnjoj Hrvatskoj povećati zimi za jedno kišno razdoblje unutar 10 godina (napomena: zbog vrlo male promjene, srednji broj kišnih razdoblja u budućoj je klimi određen za razdoblje od 10 godina). Istodobno bi se u središnjoj i južnoj Dalmaciji broj kišnih razdoblja smanjio do najviše dva razdoblja u 10 godina. Smanjenje vidimo u proljeće u Lici, u ljeto u Slavoniji, te u jesen ponovno u Lici i cijeloj Dalmaciji sa zaleđem. Smanjenje broja kišnih razdoblja nalazimo i oko sredine 21. stoljeća. Najveće smanjenje je u gorskoj i primorskoj Hrvatskoj u zimi i u proljeće, ali isto tako i u ljeto u dijelu gorske Hrvatske i sjeverne Dalmacije [33].

Broj sušnih razdoblja. Sušno razdoblje definirano je kao niz od barem 5 dana kada je količina ukupne oborine manja od 1 mm. U razdoblju 2011.-2040. broj sušnih razdoblja bi se mogao povećati u jesen u gotovo čitavoj zemlji (i ovdje je izračun rađen kroz 10-godišnje razdoblje), te u sjevernim područjima u proljeće i ljeto. U zimi bi se broj sušnih razdoblja smanjio u središnjoj Hrvatskoj, te ponegdje u primorju u proljeće i ljeto. Povećanje broja sušnih razdoblja očekuje se u praktički svim sezonama do konca 2070. Najizraženije bi bilo u proljeće i ljeto, a nešto manje u zimi i u jesen [33].

5.3. Ulazni podaci u H2RES

Ulazni podaci potrebni za modeliranje energetskog sustava Republike Hrvatske i provedbu optimizacije za razdoblje od 2020. do 2050. godine, predstavljaju datoteke u Excelu prema zahtijevanom formatu, a u korisničko sučelje će se unijeti parametri za provedbu simulacije.

Booleanovi parametri za slučaj Hrvatske odabrani su kao što prikazuje Tablica 6.

Tablica 6. Glavni parametri za model Republike Hrvatske

rps_inv	True
carbonLimit	True
res_inv	True
hydro_storage	True
exports_dat	False
save_csv	True
ceep_limit	True
NoResToHeatInv	False
PrimaryReserve	False
SecondaryReserve	False

Prema Strategiji energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu [5] i S1 scenariju ubrzane energetske tranzicije, kojeg prikazuje Tablica 7., predlaže se 88% obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu do 2050. godine. Međutim, uz nove ciljeve smanjenja emisija CO_2 za 55% do 2030. i postizanja klimatske neutralnosti do 2050., u modelu H2RES-a modelirat će se 100% OIE u 2050. godini, također prikazanih u istoj tablici.

Tablica 7. Postotak (%) obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu Hrvatske do 2050. godine prema energetskoj strategiji

	2020.	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
S1	50%	58%	66%	72%	77%	83%	88%
klimatski neutralno	50%	58,3%	67%	75%	83%	92%	100%

Ograničenja emisija CO_2 određena su prema trenutnoj europskoj politici postizanja klimatske neutralnosti do 2050., odnosno smanjenje od 55% do 2030. u odnosu na vrijednosti iz 1990. godine. Prema [30] u 1990. emisije CO_2 iznosile su 16309,3 kilotona za elektroenergetski, toplinski, industriju i sektor cestovnog prometa koji se elektrificira.

Kako bi se ispunila očekivano smanjene emisija CO_2 i povećanje udjela obnovljivih izvora energije očekuje se snažan porast cijena emisijskih jedinica. Trenutno, u 2022., cijena emisijskih jedinica je dosegnula prosjek od 70 EUR/t CO_2 dok je u 2020. u prosjeku bila oko 30 EUR/t CO_2 [37]. Cijena za simulaciju u H2RES-u procijenit će se prema [38], gdje se navodi da bi do 2050. godine mogla dosegnuti 250 \$/t CO_2. Tablica 8. prikazuje pretpostavljenu razdiobu u razdoblju do 2050. godine. CEEP je ograničen na 5%, koji je procijenjen prema literaturi [39], te predstavlja granicu do koje je ekonomski opravdana instalacija varijabilnih obnovljivih izvora energije.

Tablica 8. Cijene emisijskih jedinica do 2050. godine

	2020.	*2025.*	*2030.*	*2035.*	*2040.*	*2045.*	*2050.*
$/tCO₂	70	75	130	168	205	228	250

Konačno, Tablica 9. prikazuje podatke o parametrima strategije koji se unose u H2RES. Parametri se moraju unijeti za svaku modeliranu godinu gdje se postoci zapisuju u decimalnom zapisu. Vrijednosti između prethodno objašnjenih parametra će se linearno interpolirati.

Tablica 9. Parametri simulacije za model Republike Hrvatske

rps	0.50, 0.52, 0.53, 0.55, 0.57, 0.58, 0.60, 0.62, 0.63, 0.65, 0.67, 0.68, 0.70, 0.72, 0.73, 0.75, 0.77, 0.78, 0.80, 0.82, 0.83, 0.85, 0.87, 0.88, 0.90, 0.92, 0.93, 0.95, 0.97, 0.98, 1
CO2_limit	8071112, 7676585, 7273350, 6861406, 6440756, 6011397, 5816756, 5618035, 5415234, 5208353, 4997392, 4785765, 4570111, 4350433, 4126728, 3898999, 3667244, 3431463, 3191657, 2947826, 2699969, 2448086, 2192179, 1932245, 1668287, 1400303, 1128293, 852258, 572197, 288111, 0
carbon_price	70, 71, 72, 73, 74, 75, 86, 97, 108, 119, 130, 137.6, 145.2, 152.8, 160.4, 168, 175.4, 182.8, 190.2, 197.6, 205, 209.6, 214.2, 218.8, 223.4, 228, 232.4, 236.8, 241.2, 245.6, 250

ceep_parameter	0.05

Vrijednosti NPV-a, koji će prebacivati buduću vrijednost novca na sadašnju vrijednost, smanjivati će se za 0,04 počevši od 1 za početnu 2020. godinu do 2030. godine, a onda za 0,02 do 2050. godine. Prema [38] predviđeno je da će se investicijski troškovi za solarne sustave smanjivati od početnih 790 $/kW u 2020. godini do 460 i 340 $/kW redom u 2030. i 2050. godini. Analogno, za trošak kopnenih (1540, 1420 i 1300 $/kW) i pučinskih vjetroelektrana (3600, 2020 i 1420 $/kW). Prema tome su se modificirale promjene troškova do 2050. u odnosu na 2020. godinu. Prosječni životni vijek kotlova i toplinskih sustava je 15 godina te će se prema tome linearno modelirati stopa dekomisije. U vidu trenutnih naglih porasta cijena uvoza električne energije u 2021. godini, cijena u modelu iznosit će 100$/MWh, s povećanjem od 5% godišnje. Unesene parametre po godinama prikazuje Tablica 10.

Tablica 10. Ostali parametri za model Republike Hrvatske

NPV	1, 0.96, 0.92, 0.88, 0.84, 0.8, 0.76, 0.72, 0.68, 0.64, 0.6, 0.58, 0.56, 0.54, 0.52, 0.5, 0.48, 0.46, 0.44, 0.42, 0.4, 0.38, 0.36, 0.34, 0.32, 0.3, 0.28, 0.26, 0.24, 0.22, 0.2
TechChangeSolar	1, 0.96, 0.92, 0.87, 0.83, 0.79, 0.75, 0.71, 0.67, 0.62, 0.58, 0.57, 0.57, 0.56, 0.55, 0.54, 0.54, 0.53, 0.52, 0.51, 0.51, 0.50, 0.49, 0.48, 0.48, 0.47, 0.46, 0.45, 0.45, 0.44, 0.43
TechChangeWind	1, 0.97, 0.93, 0.90, 0.87, 0.83, 0.80, 0.77, 0.74, 0.70, 0.67, 0.66, 0.66, 0.65, 0.64, 0.63, 0.63, 0.62, 0.61, 0.61, 0.60, 0.59, 0.59, 0.58, 0.57, 0.56, 0.56, 0.55, 0.54, 0.54, 0.53
ThermalDecomInd	1, 0.92, 0.84, 0.76, 0.68, 0.6, 0.54, 0.48, 0.42, 0.36, 0.3, 0.24, 0.18, 0.12, 0.06, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
HeatPumpDecomInd	1, 0.92, 0.84, 0.76, 0.68, 0.6, 0.54, 0.48, 0.42, 0.36, 0.3, 0.24, 0.18, 0.12, 0.06, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
StaStoDecomInd	1, 0.92, 0.84, 0.76, 0.68, 0.6, 0.54, 0.48, 0.42, 0.36, 0.3, 0.24, 0.18, 0.12, 0.06, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
Import_Price	100
Imp_price_inc	0,05

Prema [40] Republika Hrvatska je u 2020. imala 2312280 registriranih cestovnih vozila od kojih su 0,1% bila električna vozila. Pretpostavlja se da je cijena predaje električne energije mreži u prosjeku 50 $/MWh, uzimajući u obzir promjenu potražnje tijekom dana. Uobičajeni kućni kapaciteti punjača električnih vozila variraju između 2,3 i 7 kW, a prosječni kapacitet baterije električnih vozila iznosi 55 kWh [41]. Postoje i brzi punjači od 50 kW (čak od 200-300 kW) koji određuju prosjek od 7 kW. Prema S1 scenariju ubrzane tranzicije u energetskoj strategiji [5] želi se postići udio od 85% električnih vozila u ukupnom cestovnom prometu. Navedeni podaci upotrijebit će se za modeliranje parametra za EV i V2G sustava kao što prikazuje Tablica 11.

Tablica 11. EV i V2G opći parametri za model Republike Hrvatske

V2G_cost	50
num_km	14100
EV_eff	5000
ev_Demand_year	0.001*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.0308*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.0606*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.0904*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.1202*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.15*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.178*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.206*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.234*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.262*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.29*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.318*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.346*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.374*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.402*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.43*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.458*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.486*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.514*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.542*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.57*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.598*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.626*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.654*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.682*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.71*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.738*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.766*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.794*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.822*num_km*number_of_veh/EV_eff, 0.85*num_km*number_of_veh/EV_eff
ev_sto_min	0
ev_Grid_eff	0.9
number_of_veh	2312280
average_ch_rate	7
average_bat	55
ev_Grid_P	0.001, 0.0308, 0.0606, 0.0904, 0.1202, 0.15, 0.178, 0.206, 0.234, 0.262, 0.29, 0.318, 0.346, 0.374, 0.402, 0.43, 0.458, 0.486, 0.514, 0.542, 0.57, 0.598, 0.626, 0.654, 0.682, 0.71, 0.738, 0.766, 0.794, 0.822, 0.85

ev_stor	0.001, 0.0308, 0.0606, 0.0904, 0.1202, 0.15, 0.178, 0.206, 0.234, 0.262, 0.29, 0.318, 0.346, 0.374, 0.402, 0.43, 0.458, 0.486, 0.514, 0.542, 0.57, 0.598, 0.626, 0.654, 0.682, 0.71, 0.738, 0.766, 0.794, 0.822, 0.85

5.4. Ulazne datoteke

Ulazne datoteke potrebne za modeliranje elektroenergetskog sustava predstavljaju distribucije potražnje energije, distribucije dostupnosti resursa, troškove i tehničke karakteristike sustava.

5.4.1. Podaci o proizvodnim kapacitetima elektroenergetskog sustava

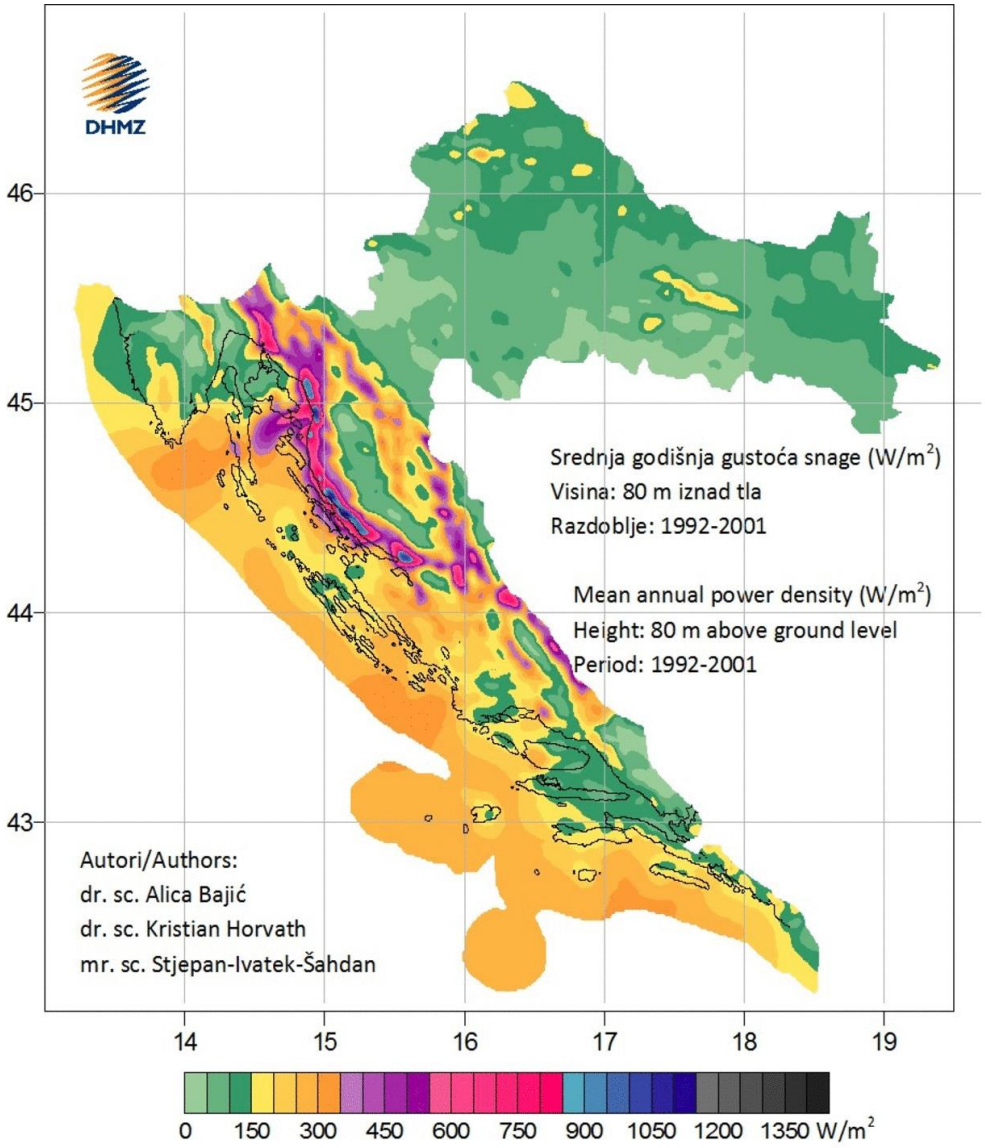
Podaci o trenutnim proizvodnim kapacitetima i njihovim tehničkim karakteristikama prikupljeni su iz Dispa-SET [34] paketa podataka te su se prilagodili prema [36] za baznu 2020. godinu. Za postrojenja čiji faktori opterećenja ovise o zemljopisnom položaju, odnosno potencijalu izvora energije, odabrano je više proizvodnih zona ovisno o njihovim karakteristikama. Sve proizvodne kapacitete prikazuje Tablica 12.

Tablica 12. Podaci o proizvodnim kapacitetima za Republiku Hrvatsku

Naziv	Tip	Kapacitet (MW)
TE-TO Osijek	prirodni plin	89
TE-TO Zagreb	prirodni plin	300
El-TO Zagreb	prirodni plin	50
KTE Jertovec	prirodni plin	76
TE Plomin 2	ugljen	199
Bovis	biomasa	1
mTEO Jakuševac	biomasa	2,036
PZ Osatina	biomasa	1
TE Biomasa HR	biomasa	80,2
NPP Krško HR	nuklearna energija	348
HE Zakučac	akumulacijska hidroelektrana	538
HE Senj	akumulacijska hidroelektrana	216
HE Dubrovnik HR	akumulacijska hidroelektrana	235
HE Vinodol	akumulacijska hidroelektrana	90
HE Peruča	akumulacijska hidroelektrana	60
HE Sklope	akumulacijska hidroelektrana	22,5
RHE Velebit	crpna hidroelektrana	270
RHE Orlovac	crpna hidroelektrana	237

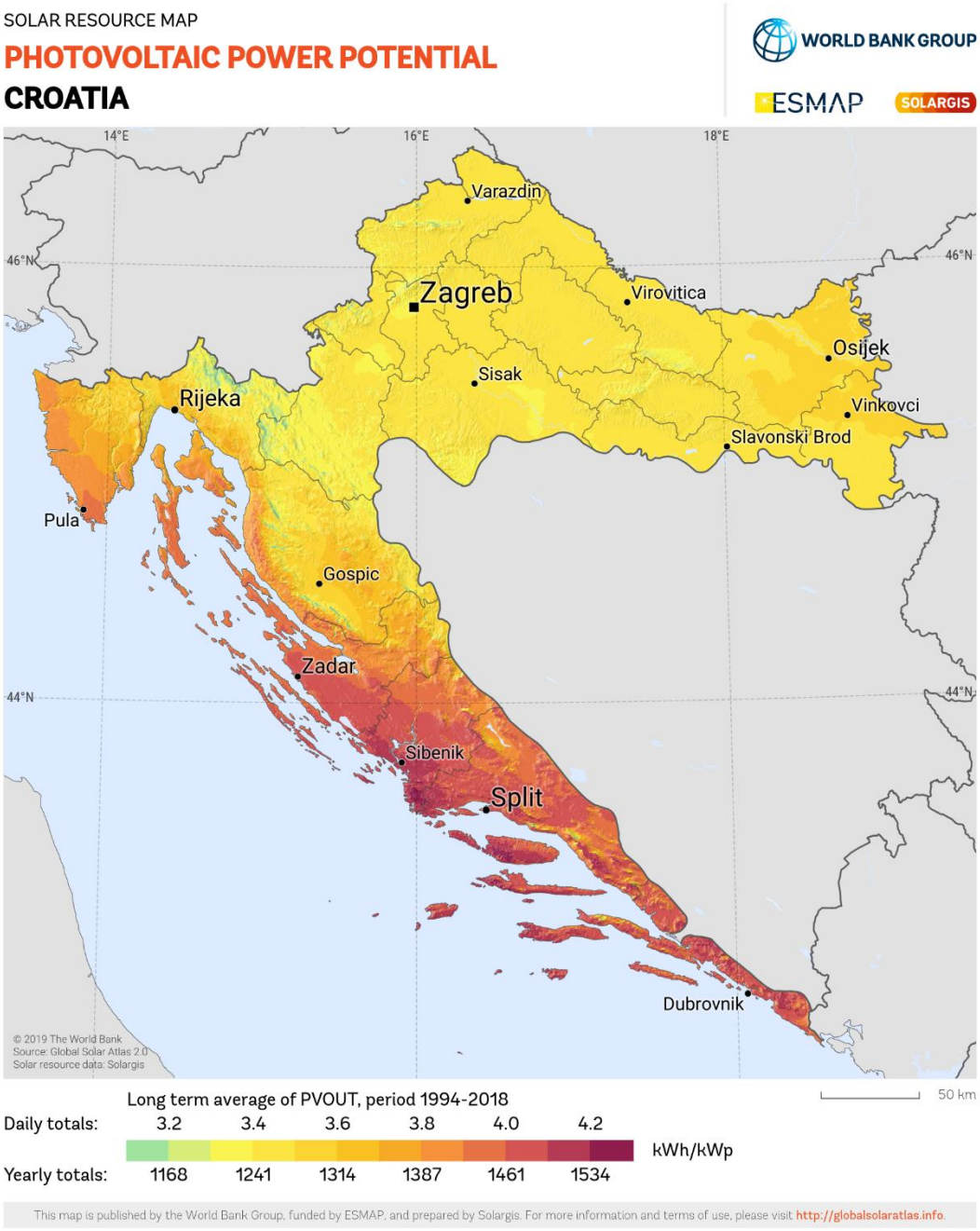
RHE Vinodol	crpna hidroelektrana	5,4
HE Varaždin	protočna hidroelektrana	94,6
HE Dubrava	protočna hidroelektrana	79,78
HE Čakovec	protočna hidroelektrana	77,44
HE Gojak	protočna hidroelektrana	55,5
HE Kraljevac	protočna hidroelektrana	46,4
HE Lešće	protočna hidroelektrana	41,2
HE Đale	protočna hidroelektrana	40,8
HE Rijeka	protočna hidroelektrana	36,8
HE Miljacka	protočna hidroelektrana	20
mHE Hrvatska	protočna hidroelektrana	33
HR_Wind1	energija vjetra	0
HR_Wind2	energija vjetra	301,3
HR_Wind3	energija vjetra	500
HR_Wind4	energija vjetra	0
HR_Solar1	solarna energija	40
HR_Solar2	solarna energija	68,5

Proizvodne zone iz solarne i energije vjetra odabrane su prema mogućim potencijalima dostupnosti resursa. Prema prikazu srednje godišnje gustoće snage vjetra na 80 m iznad tla sa Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) [29], odabrale su se četiri zone proizvodnje električne energije iz snage vjetra, nazvane HR_Wind1, HR_Wind2, HR_Wind3 za kopnene vjetroelektrane i HR_Wind4 za pučinske vjetroelektrane. Područje koje obuhvaća HR_Wind1, sjeverna i istočna Hrvatska na karti prikazana zelenom bojom, ima najnižu gustoću snage vjetra, HR_Wind2, obala Jadrana prikazana žutom, ima srednju gustoću snage vjetra, dok HR_Wind3, Gorska Hrvatska prikazana ljubičastom, ima najvišu srednju gustoću snage vjetra.



Slika 52. Srednja gustoća snage vjetra na 80 m za Republiku Hrvatsku [29]

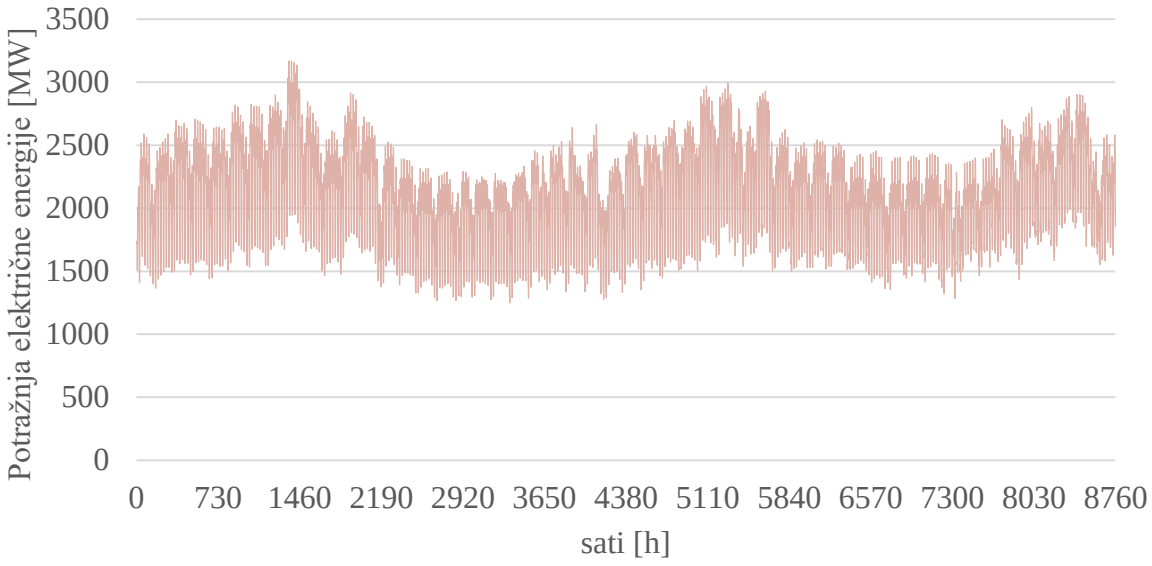
Isto tako prema [35] odabrane su dvije zone proizvodnje solarne energije, HR_Solar1 i HR_Solar2 , gdje područje proizvodnje HR_Solar1, uglavnom područje sjeverne i istočne Hrvatske prikazano žutom bojom, ima niži potencijal proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana, a područje HR_Solar2, područje Dalmacije prikazano crvenom bojom, viši potencijal proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana.



Slika 53. Potencijal proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana na području Republike Hrvatske [35]

5.4.2. Potražnja električne energije

Krivulje opterećenja preuzele su se s ENTSO-e [42], a potražnja se modelirala kako je opisano u poglavlju 4.2.1. Slika 54. prikazuje distribuciju potrošnje električne energije u baznoj 2020. godini.



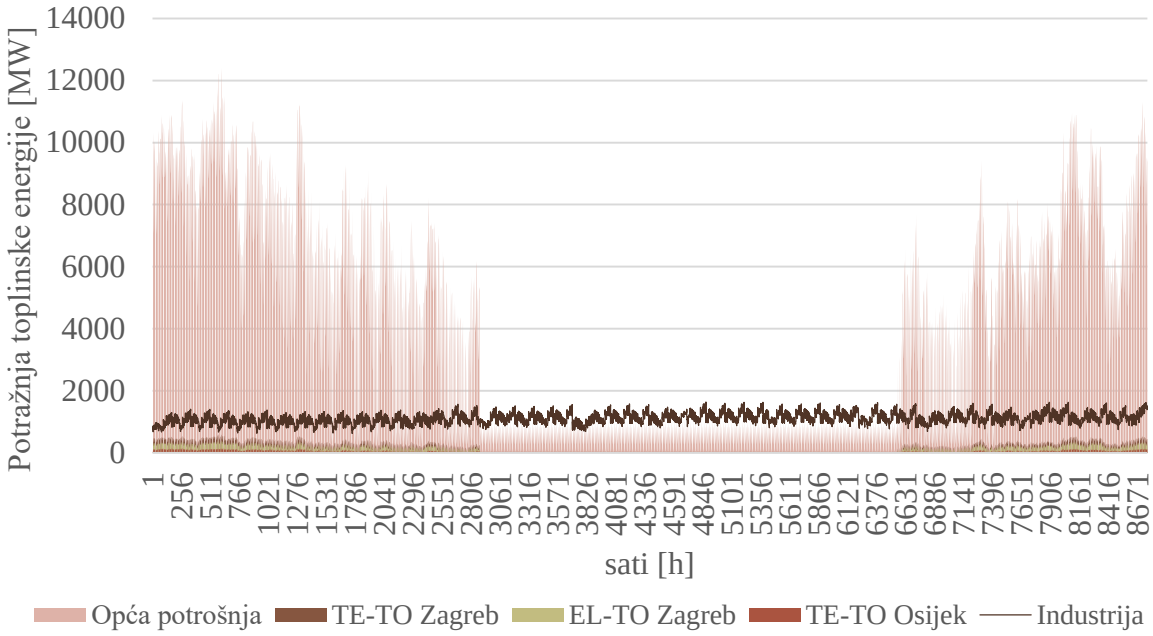
Slika 54. Potrošnja električne energije u baznoj godini

5.4.3. Potražnja toplinske energije

Toplinsko opterećenje računalo se podacima vanjske temperature za grad Zagreb, Osijek, Slavonski Brod, Varaždin i Bjelovar, a podaci su se preuzeli s online alata Renewables.ninja [43]. Za individualnu potražnju toplinske energije izradila se prosječna krivulja vanjske temperature prema težinskog faktoru broja stanovnika svakog grada. Ukupna potražnja toplinske energije preuzela se iz Eurostat-a [44], a iznosi 19 TWh u 2020. godini. Pretpostavlja se smanjenje potražnje toplinske energije uz provedbu energetske obnove, smanjenja populacije i povećanja prosječnih temperatura.

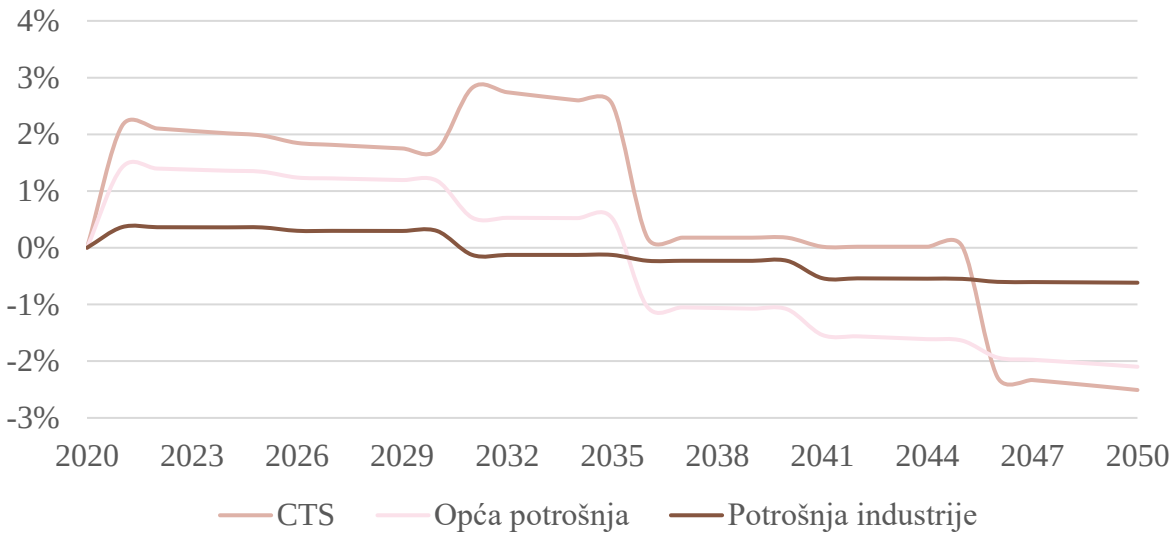
Pretpostavljene su tri zone centraliziranog toplinskog sustava TE-TO Zagreb, EL-TO Zagreb i TE-TO Osijek te su se za njih koristile vanjske temperature samo za gradove u kojima se nalaze. Podaci o potrošnji ukupnoj potražnji energije preuzeti su s godišnjeg energetskog pregleda energije u Hrvatskoj [36], a iznosi ukupno 1,8 TWh u sustavima centraliziranih toplinskih sustava.

Industrijska potražnja također se preuzela iz Eurostat-a [44] u udjelima od 49,8% prirodnog plina, 15,1% ugljena, 29% nafte i 6,1% biomase. Distribucija potrošnje toplinske energije u baznoj 2020. godini prikazuje Slika 55.



Slika 55. Potražnja toplinske energije u baznoj godini

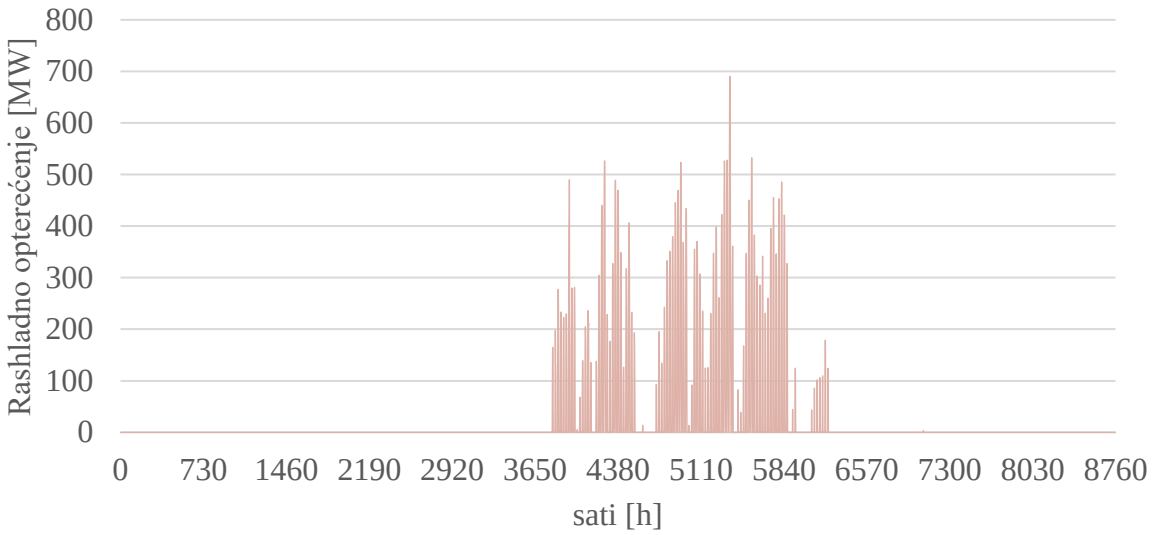
Distribucija promjene potrošnje do 2050. godine u općoj potrošnji toplinske energije, centraliziranim toplinskim sustavima i industriji određena je prema studiji potencijala učinkovitosti u sektoru grijanja i hlađenja opisanog u [45]. Slika 56. prikazuje postotnu promjenu potrošnje toplinske energije u sektorima do 2050. godine.



Slika 56. Promjena potrošnje toplinske energije u sektorima do 2050. godine

5.4.4. Potražnja rashladne energije

Potražnja rashladne energije računa se prema poglavlju 4.2.3. U baznoj 2020. godini iznosi 0,2 TWh i prikazuje ju Slika 57. Promjena potrošnje do 2050 godine, također se oblikovala prema [45] i do 2050. potražnja rashladne energije iznosi 2,3 TWh.



Slika 57. Potražnja rashladne energije u baznoj godini

5.4.5. Potražnja vodika

Potražnja vodika modelirala se za transportni sektor kako bi se ispunio cilj klimatske neutralnosti do 2050. godine. Budući da se pretpostavlja udio od 85% električnih vozila, ostalo će se pokriti vozilima s gorivnim člancima. Ista distribucija satne raspodjele će se koristiti kao i kod električnih vozila, no prilagoditi će se potražnja vodika. Prilikom određivanja potražnje pazilo se da se koristi energija sadržana u vodiku. Stoga se odredila tražena prevaljena udaljenost u kilometrima koja se odnosi na transport s gorivom na bazi vodika, a energetska učinkovitost vozila na gorivne članke preuzela se iz [28] i iznosi 3 km/kWh.

5.4.6. Potražnja električnih vozila

Satna distribucija potražnje električne energije dobila se iz RESFLEX projekta [47] u kojem su se postavili GPS lokatori na vozila te se iz prikupljenih podataka napravila statistička analiza i obrada podataka kako bi se kreirale satne distribucije potrošnje tijekom godine. Krivulja

predstavlja samo satnu distribuciju, dok sa stvarna potrošnja modelirala EV i V2G općim parametrima kako je opisano u poglavlju 5.3.

5.4.7. Varijabilni troškovi goriva

Podaci o varijabilnim troškovima tehnologija s obzirom na goriva modelirali su se prema projekcijama iz [46] za Europsku uniju i to prema IEA World Energy Outlook 2016. Prema njemu se predviđa povećanje cijena nafte za 217% do 2030. i 268% do 2050. Cijena ugljena raste za 30% do 2030. te 40% do 2050. godine. Povećanje cijena prirodnog plina do 2030. iznosi 47%, a do 2050. 81%. Projekcije su u odnosu na cijene iz 2020. godine. Pretpostavlja se da se varijabilni trošak nuklearne energije neće mijenjati, a trošak biomase će se do 2050. povećati za 21%. Prema današnjim trendovima, može se pretpostaviti da će troškovi rasti i više nego što je predviđeno.

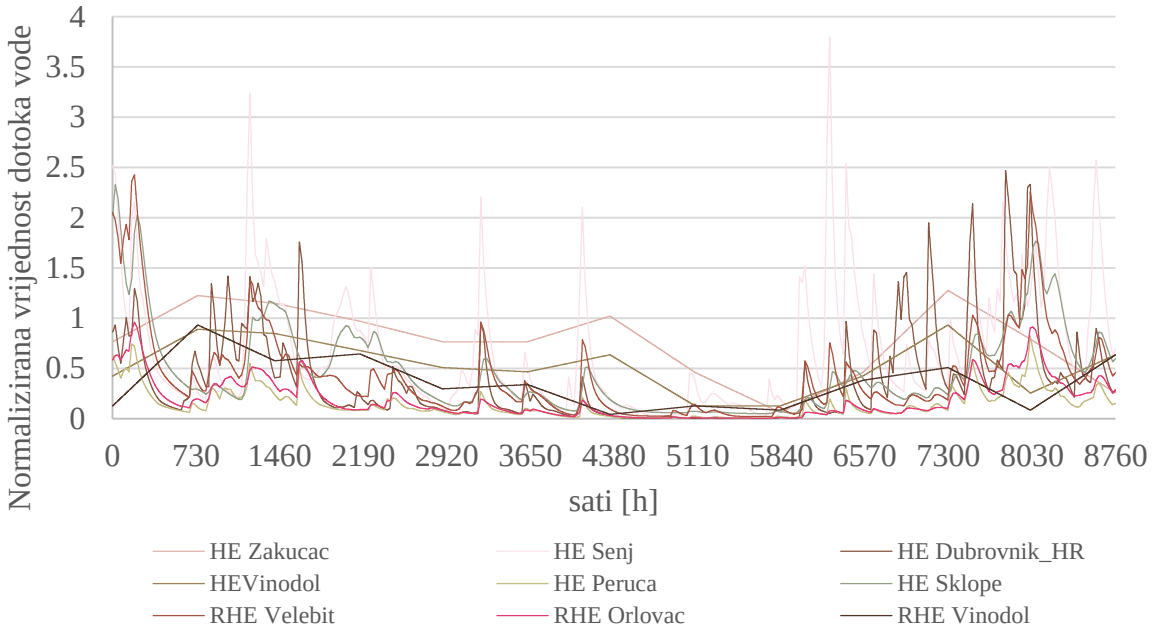
5.4.8. Faktori dostupnosti obnovljivih izvora energije

Krivulje s faktorima dostupnosti za bazne godine preuzele su se s Dispa-SET [34] baze podataka za protočne hidroelektrane, a za potencijalne zone instalacije fotonaponskih i vjetroelektrana, opisanih u poglavlju 5.4.1 o proizvodnim kapacitetima, koristit će se nekoliko različitih distribucija preuzetih s Renewable.ninja [43] koje predstavljaju različite lokacije instalacije. Preuzeti su podaci u razdoblju od 2015. do 2020 godine, te će se ponavljati kako bi se dobila distribucija do 2050. godine. Distribucija protočnih hidroelektrana do 2050. godine dobila sa tako da su se podaci o protocima svake hidroelektrane proširili sa normaliziranom prosječnom distribucijom nekoliko mjernih postaja s protokom vode, u razdoblju od 2015. do 2020. godine, dobivenih iz DHMZ-a [29]. Potom se ta distribucija ponovno ponavljala kako bi se dobile satne vrijednosti za svaku hidroelektranu do 2050. godine te se modificirale s obzirom na projekcije u budućnosti.

5.4.9. Dotoci vode u akumulacije

Satne distribucije za baznu godinu o dotocima u akumulacije akumulacijskih hidroelektrana preuzete su s Dispa-SET baze podataka [34]. Ulazi su definirani kao normalizirane vrijednosti dotoka u odnosu na nazivnu snagu. Krivulja do 2050. dobila se tako da su se vrijednosti proširile usporedbom odnosa proizvodnje akumulacijskih hidroelektrana od 2015. do 2020. godine

prema podacima iz [36]. Tako dobivene krivulje ponavljale su se kako bi se dobila distribucija do 2050. godine te se modificirale s obzirom na projekcije u budućnosti .



Slika 58. Dotoci u akumulacije u baznoj godini

5.4.10. Uvoz/izvoz

Podaci o uvozu i izvozu, kao i o prijenosnim kapacitetima, prikupili su se iz ENTSO-e [42] baze podataka za baznu godinu.

5.4.11. Fleksibilne tehnologije

Kretanje investicijskih troškova do 2050. modelirano je za različite tehnologije prema [48]. Uz to su uneseni i trenutni kapaciteti te njihove tehničke karakteristike, u traženom formatu Flex_tech datoteke. U 2020. godini najpristupačnije tehnologije su spremnik vodika sa 57 000 $/MW i električni kotao s 150 000 $/MW. Do 2050. očekuje se daljnje smanjenje troškova koji bi iznosili 21 000 $/MW i 130 000 $/MW redom.

6. SCENARIJI DOSTUPNOSTI RESURSA

Kako bi se proučile promjene dostupnosti resursa provest će se simulacije tri scenarija: jedan bez ikakvih promjena i dva u kojima se dostupnost resursa mijenja u budućnosti. Prema prognozi budućih vremenskih uvjeta prikazanih u poglavlju 5.2. i u odnosu na obrazac kretanja meteoroloških parametara iz povijesnih podataka iz poglavlja 5.1., izradit će se dva scenarija budućih dostupnosti resursa s obzirom na klimatske promjene: scenarij očekivanog razvoja i scenarij ekstremnih vremenskih uvjeta do 2050. godine. Kako bi se te promjene simulirale u modelu H2RES-a, potrebno je dodatno modelirati dvije ulazne datoteke, dotok vode u akumulacije akumulacijskih hidroelektrana te faktore dostupnosti solarnih, vjetro i protočnih hidroelektrana. Sve promjene odnose se krivulje iz scenarija bez promjena. Rezultati razdoblja klimatskog modeliranja od 2011.-2040. primijenit će se na model do 2040., a razdoblje klimatskog modeliranja od 2041.-2070. na razdoblje do 2050. godine u modelu H2RES-a.

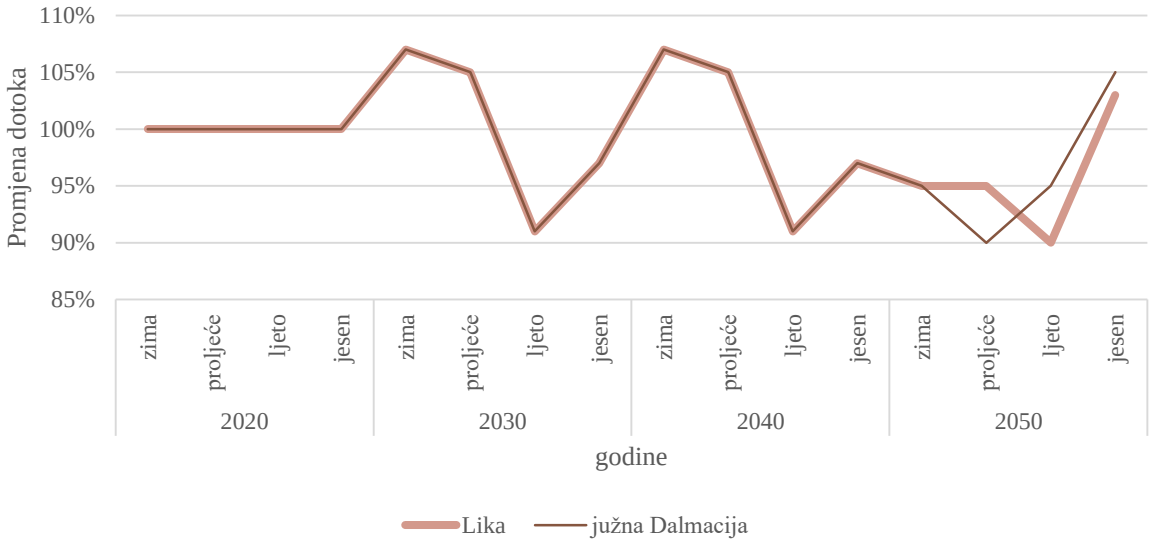
6.1. Scenarij bez utjecaja klimatskih promjena

Scenarijem bez promjena simulira se elektroenergetski sustav Republike hrvatske do 2050. godine modeliran s ulaznim parametrima i podacima opisanim u poglavlju 5.3 i 5.4 bez dodatnih modifikacija krivulja dostupnosti resursa.

6.2. Scenarij očekivanog razvoja

Za dotoke u akumulacije hidroelektrana razmotrit će se prognoze budućih oborina i evapotranspiracije. Za bolju analizu pretpostavke će se podijeliti na područje Like i južnog Jadrana. Akumulacijske hidroelektrane Orlovac, Zakučac, Peruča i Dubrovnik nalaze se u južnoj Dalmaciji, dok se hidroelektrane Velebit, Senj, Vinodol i Sklope nalaze u Gorskoj Hrvatskoj, odnosno Lici. Promjena dotoka prikazuje Slika 59.

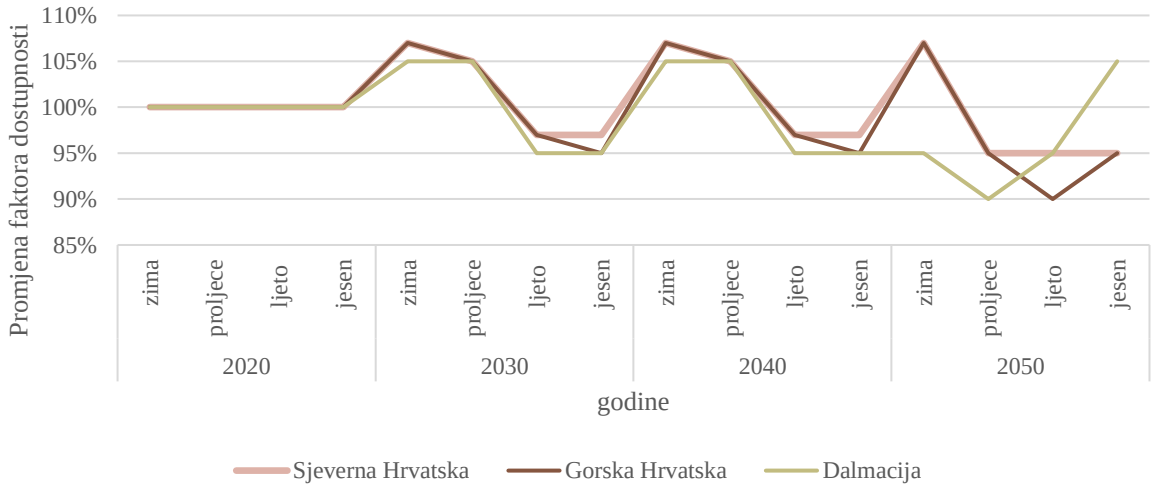
- Dotoci hidroelektrana u Lici do 2040. godine zimi će porasti za 7%, a u proljeće 5%. U ljeto će se smanjiti za 9%, a u jesen za 3%. Do 2050. dotoci u proljeće i zimu će se smanjiti za 5%, ljeti će biti 10% manji, a u jesen će porasti za 3%.
- Dotoci hidroelektrana u južnoj Dalmaciji do 2040. godine zimi će porasti za 7%, a u proljeće 5%. U ljeto će se smanjiti za 9%, a u jesen za 3%. Do 2050. dotoci ljeti i zimi će se smanjiti za 5%, u proljeće će biti 10% manji, a u jesen će porasti za 5%.



Slika 59. Promjena dotoka u akumulacijske hidroelektrane

Protočne hidroelektrane također će se podijeliti na više područja: sjeverna Hrvatska gdje se nalaze hidroelektrane Varaždin, Dubrava i Čakovec; Gorska Hrvatska s hidroelektranama Rijeka, Gojak, Lešće, a koje će vrijediti i za distribuciju malih hidroelektrana; Dalmacija s hidroelektranama Kraljevac, Đale i Miljacka. Promjenu faktora opterećenja prikazuje Slika 60.

- Faktori opterećenja u sjevernoj Hrvatskoj do 2040. godine zimi će porasti za 7%, a u proljeće 5%. U ljeto i jesen će se smanjiti za 3%. U razdoblju do 2050. u proljeće, ljeto i jesen smanjit će se za 5%, a u zimi će porasti za 7%.
- Faktori opterećenja u Gorskoj Hrvatskoj do 2040. godine zimi će porasti za 7%, a u proljeće 5%. U ljeto će se smanjiti za 3%, a u jesen za 5%. Do 2050. u jesen i proljeće će se smanjiti za 5%, ljeti će biti 10% manji, a zimi će porasti za 7%.
- Faktori opterećenja u Dalmaciji do 2040. godine u proljeće i zimu će porasti za 5%, a u ljeto i jesen će se smanjiti za 5%. Do 2050. ljeti i zimi će se smanjiti za 5%, u proljeće će biti 10% manji, a u jesen će porasti za 5%.



Slika 60. Promjena faktora opterećenja hidroelektrana

Prognoze budućeg solarnog zračenja razmatrat će se na utjecaj faktora opterećenja solarnih elektrana. Također će se prema već pretpostavljenim zonama HR_Solar1 i HR_Solar2 razmatrati dva različita područja.

- Faktori opterećenja za HR_Solar1 do 2040. zimi se smanjuju za 3%, a u proljeće , ljeto i jesen se povećavaju za 3%. Do 2050. u svim razdobljima osim u zimi faktori opterećenja rastu za 5%.
- Faktori opterećenja za HR_Solar2 do 2040. zimi se smanjuju za 3%, a u proljeće ostaju isti. U ljeto i jesen se povećavaju za 3%. Do 2050. u svim razdobljima osim u zimi faktori opterećenja rastu za 8%.

Brzina vjetra u prognozama budućeg razvoja koristit će se za oblikovanje faktora opterećenja vjetroelektrana. Kao i kod solarnih elektrana koristit će se unaprijed pretpostavljene zone razvoja vjetroelektrana HR_Wind1, HR_Wind2, HR_Wind3 i HR_Wind4. Kao što je prikazano u povijesnim podacima, a i dalje potvrđeno simulacijom budućih uvjeta, brzina vjetra nema neke znatne promijene i ostaje u svom dosadašnjem rasponu, tako da će u svim razdobljima i zonama ostati ista, osim ako nije drugačije navedeno.

- Faktori opterećenja za HR_Wind1 do 2040. i 2050. ostaju isti.
- Faktori opterećenja za HR_Wind2 do 2040. i 2050. ostaju isti.
- Faktori opterećenja za HR_Wind3 do 2040. i do 2050. rastu u jesen za 5%.

- Faktori opterećenja za HR_Wind4 do 2040. u jesen rastu 15%, a u ljeto za 5%. Do 2050. ljeti se očekuje porast od 5%, a u jesen 20%

6.3. Scenarij s većom učestalosti ekstremnih vremenskih uvjeta

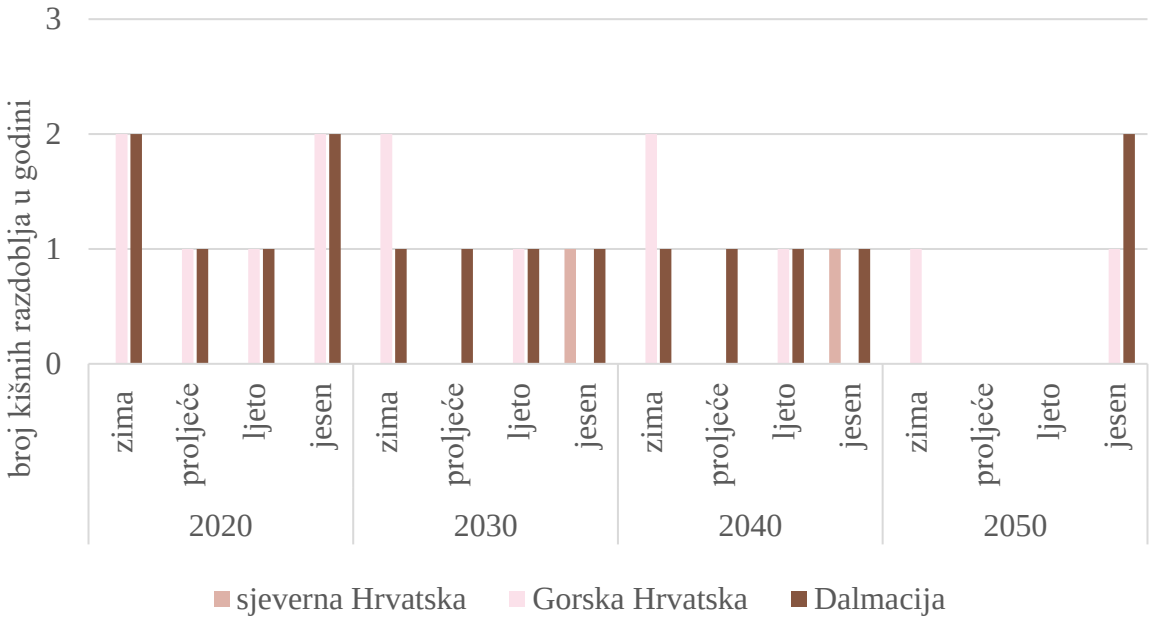
Ekstremni vremenski uvjeti ovdje predstavljaju pojave koje bi se dodatno javljale promjenom klime u budućnosti. Prilikom modeliranja ekstremnih pojava u budućoj klimi u obzir se uzimaju projekcije napravljene u scenariju očekivanog razvoja te se nadograđuju razmatranjima o ekstremnim pojavama iz klimatskog modela [33]. Kao i u prethodnom poglavlju, za bolje modeliranje razmatrat će se više zona na koje utječu ekstremni uvjeti. Ekstremni uvjeti će se pronaći u dosadašnjem modelu te izmijeniti u odnosu na pretpostavke klimatskog modela.

Sušni i vlažni dani predstavljaju niz od barem 5 takvih karakterističnih dana. Promjena karakterističnih razdoblja navode se u intervalu od 10 godina, kako je provedeno klimatskim modeliranjem. Hidrološki uvjeti će se promatrati za 3 različite zone:

- sjeverna Hrvatska gdje se nalaze hidroelektrane Varaždin, Dubrava i Čakovec
- Gorska Hrvatska s hidroelektranama Rijeka, Gojak, Lešće, male hidroelektrane i akumulacijske hidroelektrane Velebit, Senj, Vinodol i Sklope
- Dalmacija s hidroelektranama Kraljevac, Đale i Miljacka i akumulacijskim hidroelektranama Orlovac, Zakučac, Peruča i Dubrovnik.

Broj kišnih razdoblja, kako prikazuje Slika 61., kreće se kako slijedi:

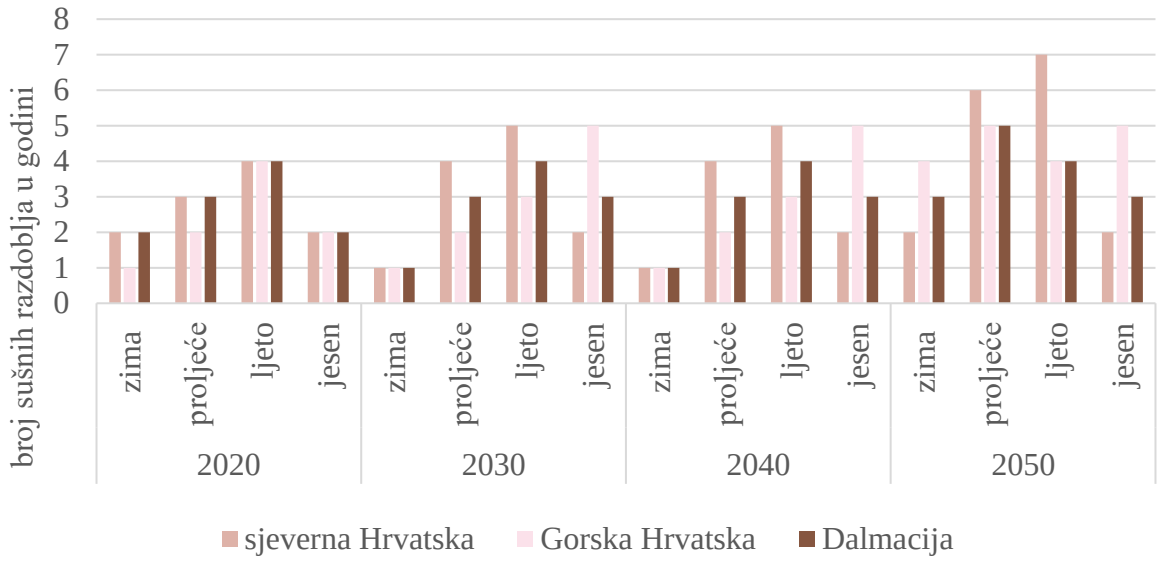
- Sjeverna Hrvatska: za područje sjeverne Hrvatske do 2040. predviđeno je jedno vlažno razdoblje u jesen. Do 2050. godine nema promjena.
- Gorska Hrvatska: za područje Gorske Hrvatske do 2040. predviđena su 2 kišna razdoblja u zimu i jedno ljeti. Do 2050. godine ima samo jedno kišno razdoblje i to zimi.
- Dalmacija: za područje Dalmacije do 2040. predviđeno je po jedno kišno razdoblje u svako godišnje doba. Do 2050. godine ima 2 kišna razdoblja u jesen.



Slika 61. Broj kišnih razdoblja do 2050. godine

Broj sušnih razdoblja, kako prikazuje Slika 62., kreće se kako slijedi:

- Sjeverna Hrvatska: za područje sjeverne Hrvatske do 2040. predviđeno je jedno sušno razdoblje u zimu, 4 u proljeće, 5 ljeti i 2 u jesen, u periodu od 10 godina. Do 2050. ima 2 sušna razdoblja u zimu, 6 u proljeće, u ljeto 7, a u jesen 2.
- Gorska Hrvatska: za područje Gorske Hrvatske do 2040. predviđeno je jedno sušno razdoblja u zimu, 2 u proljeće, 3 ljeti i 5 u jesen. Do 2050. godine u zimu ima 4 sušna, u proljeće 5, ljeti 4, a u jesen 5 razdoblja.
- Dalmacija: za područje Dalmacije do 2040. predviđeno je po jedno sušno razdoblje u zimu, 3 u proljeće i jesen te 4 ljeti. Do 2050. godine ima 3 sušna zimi, u proljeće 5, ljeti 4, a u jesen 3 razdoblja.



Slika 62. Broj sušnih razdoblja do 2050. godine

Ekstremni uvjeti za solarno zračenje razmatraju se samo za ljetno razdoblje prema broju dana kad je maksimalna temperatura veća od 30 °C. Razmatraju se zone sjeverne i istočne Hrvatske, HR_Solar1, i Dalmacije, HR_Solar2, prema podacima kako slijedi. U obje zone ima prosječno 25 dana ljeti s maksimalnom temperaturom većom od 30 °C. Do 2040. godine broj dana bi se povećao na 37, a do 2050. na 45 dana tijekom ljeta u jednoj godini. Prema navedenom, istovjetno će se pretpostaviti povećanje ekstremnih vrijednosti solarnog zračenja te posljedično faktora opterećenja fotonaponskih elektrana.

Dani s maksimalnom brzinom vjetra većom od 20 m/s, karakteristični su samo za zimsko desetogodišnje razdoblje i vrijede samo za HR_Wind4 (pučinsko područje) i HR_Wind3, (Gorska Hrvatska) pretpostavljene zone razvoja vjetroelektrana. I do 2040. i do 2050. pretpostavit će se jedno sedmodnevno zimsko razdoblje povećanja brzine vjetra za zonu HR_Wind4 i jedno četverodnevno za zonu HR_Wind3 godišnje.

7. REZULTATI

Prikazani su rezultati provedbe simulacije tri scenarija s obzirom na dostupnost resursa. Na kraju je dana i usporedba najvažnijih parametra između scenarija.

7.1. Rezultati scenarija bez utjecaja klimatskih promjena

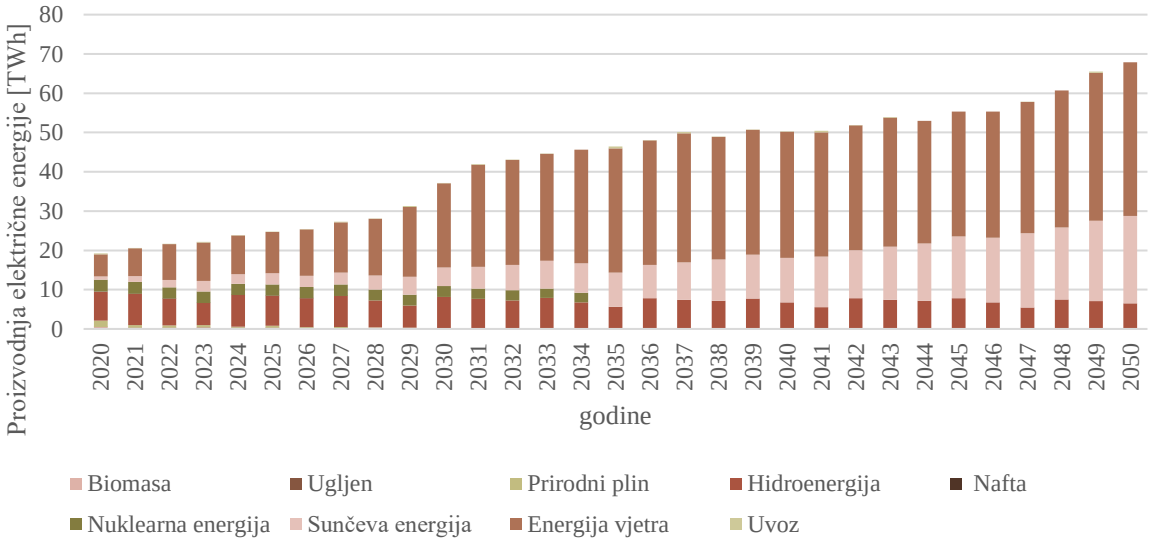
Prilikom provedbe scenarija simulacija se nije mogla provesti s ograničenjem instalacije novih kapaciteta obnovljivih izvora energije na inicijalno postavljenih 300 MW po godini. Stoga, su se kapaciteti povećali na 450 MW za fotonaponske elektrane i 600 MW za vjetroelektrane. Tablica 13. prikazuje instalirane kapacitete do 2050. godine za scenarij bez utjecaja klimatskih promjena. Prevladava instalacija u zonama HR_Solar2 i HR_Wind4.

Tablica 13. Instalirani proizvodni kapaciteti u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena

[MW]	HR_Solar1	HR_Solar2	HR_Wind1	HR_Wind2	HR_Wind3	HR_Wind4
2020.	0	450	0	0	600	600
2021.	0	450	0	0	0	409,37
2022.	0	299,59	0	0	45,68	600
2023.	0	450	0	0	0	240,27
2024.	0	0	0	0	0	0
2025.	0	159,07	0	0	121,5	1,64
2026.	0	0	0	0	93,93	492,62
2027.	0	120,92	0	0	22,93	236,95
2028.	0	449,99	0	0	407,41	98,84
2029.	0	450	0	0	600	600
2030.	0	450	0,17	0	600	600
2031.	0	450	0	0	600	600
2032.	0	450	0	0	96,89	600
2033.	0	450	0	0	0	0
2034.	0	450	0	0	275,26	179,8
2035.	0	450	0	0	445,11	599,99
2036.	0	450	0	0	0	0
2037.	0	450	0	0	0	0
2038.	0	450	0	0	0	0
2039.	0	450	0	0	0	0
2040.	0	450	0	0	0	0
2041.	0	450	0	0	0	0
2042.	0	450	0	0	0	0
2043.	0	450	0	0	0	0
2044.	44,36	450	0	0	0	0
2045.	450	450	0	0	0	0
2046.	450	450	0	0	0	0
2047.	450	450	0	0	0	552,2
2048.	450	450	0,01	0	24,51	436,18
2049.	450	450	71,23	0	0	470,61

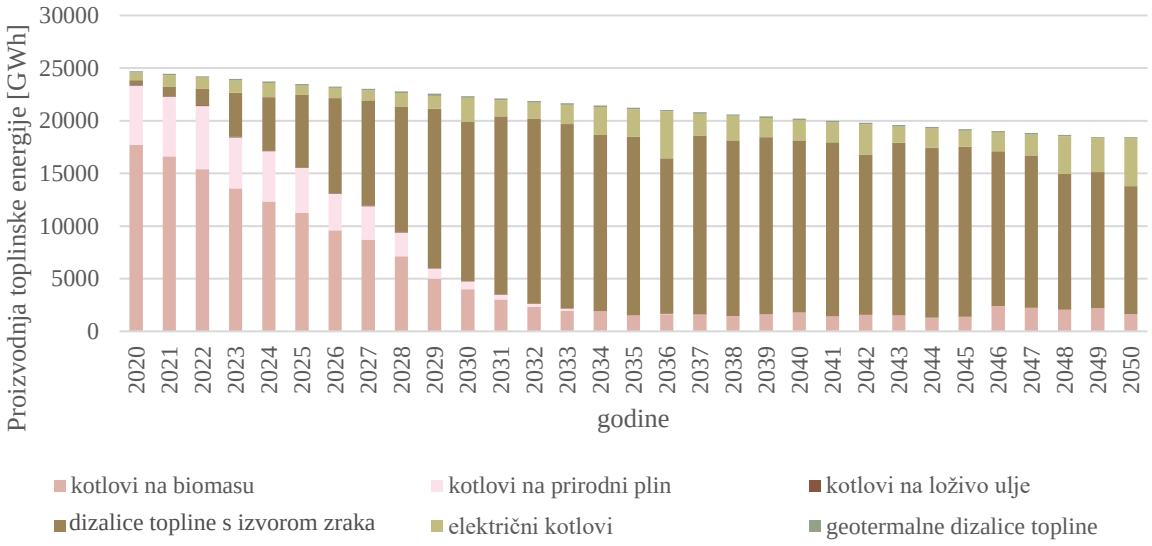
2050.	450	450	600	0	0	600
UKUPNO	2744,36	12279,57	671,41	0	3933,22	7918,47

Energija vjetra u udjelima proizvodnje električne energije zauzima najveći dio kao što prikazuje Slika 63., a slijedi je sunčeva i hidroenergija. Udio hidroelektrana u ukupnom miksu pada, što može biti jer se više koriste za opskrbu vršnih opterećenja i za uravnoteženje pa sveukupno manje proizvode.



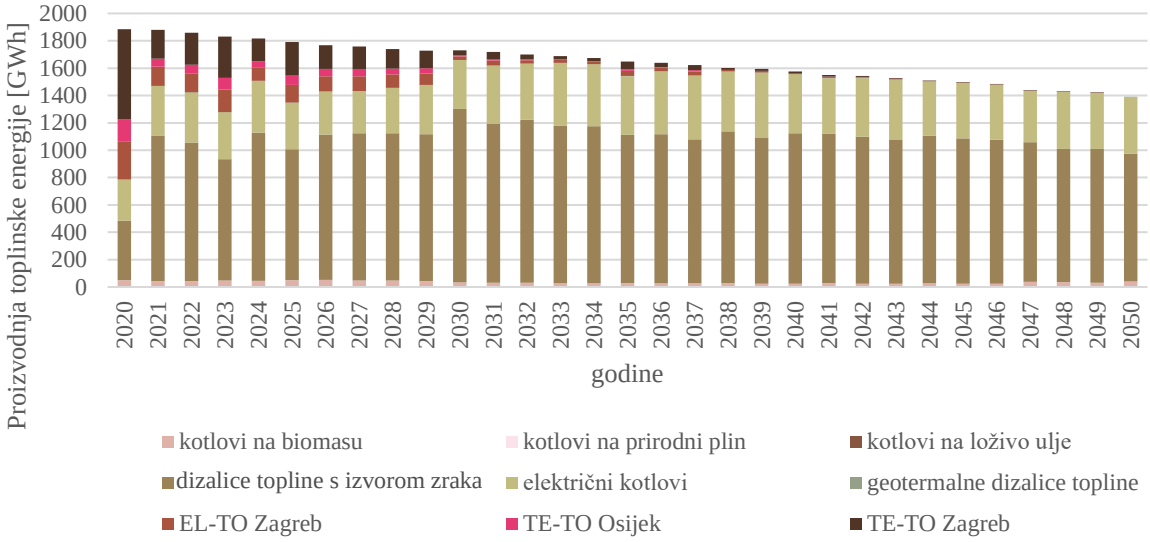
Slika 63. Proizvodnja električne energije u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena

Individualni sustavi grijanja, Slika 64., u početku promatranog razdoblja temelje se na kotlovima na biomasu, međutim vrlo brzo će potražnju preuzeti dizalice topline s izvorom zraka u najvećoj mjeri. Već do 2030. kotlove na prirodni plin bi skoro potpuno zamijenile druge tehnologije opskrbe individualnih sustava toplinskom energijom. Opskrba električnim kotlovima postepeno raste te bi do 2050. godine pokrivala četvrtinu proizvodnje toplinske energije.



Slika 64. Proizvodnja toplinske energije u individualnim sustavima grijanja u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena

Proizvodnja toplinske energije u centraliziranim toplinskim sustavima također se vrlo brzo prebacuje na tehnologije bez upotrebe fosilnih goriva. Kao i kod individualnog grijanja, dominanta tehnologija je dizalice topline s izvorom zraka, a slijede ih električni kotlovi i mali dio kotlova na biomasu do 2050. godine. Može se primijetiti da vrlo brzo, već do 2030. godine, skoro pa prestaje proizvodnja topline iz kogeneracijskih postrojenja. Osim visokih cijena fosilnih goriva i emisijskih jedinica, proizvodnju električne energije u kogeneracijama vrlo brzo zamjenjuju obnovljivi izvori energije pa proizvodnja električne, a time i toplinske energije, vrlo brzo postaje neisplativa unatoč tome što je dekomisija kogeneracija predviđena tek u 2050. godini. Odnos proizvodnje prema tehnologijama u centraliziranom toplinskom sustavu prikazuje Slika 65.



Slika 65. Proizvodnja toplinske energije u CTS-u u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena

Tablica 14. prikazuje ukupno instalirane kapacitete u sektoru toplinske energije do 2050. godine. Najviše je instalirano dizalica topline s izvorom zraka, a slijede ih električni kotlovi. Budući da se većina toplinskog sektora opskrbljuje individualnim sustavima, najviše investicija je upravo u takve kapacitete dok su investicije u CTS puno manje. Također, primjećuje se da se većina kapaciteta instalira u prvoj polovici promatranog razdoblja, kada se prebacuje većina kapaciteta na obnovljive izvore energije, a u kasnijim godinama investicije bi bile skoro i zanemarive te bi bile potrebne samo u slučaju obnove kapaciteta starenjem tehnologija.

Tablica 14. Ukupni instalirani kapaciteti za toplinske potrebe u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena

[MW]	*kotlovi na biomasu*		*kotlovi na prirodni plin*		*kotlovi na loživo ulje*		*dizalice topline s izvorom zraka*		*električni kotlovi*		*geotermalne dizalice topline*	
	CTS	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**
2020.	39,1	357,83	0,03	0	0	0	131,93	0	198,14	0	0,03	0
2021.	0	533,49	0	0	0	0	97,12	0	18,18	0	0	10,78
2022.	0	69,49	0	0	0	0	0	97,27	0	93,71	0	0,82
2023.	0	0	0	0	0	0	0,01	216,79	0	764,34	0	0,8
2024.	0	0	0	0	0	0	3,04	687,36	0	295,06	0	0,8
2025.	0	0	0	0	0	0	0,02	426,06	0	557,65	0	0,8
2026.	0	0	0	0	0	0	6,99	531,63	0	175,6	0	0,6
2027.	0	0	0	0	0	0	0,02	508,49	0	200	0	0,6
2028.	0	0	0	0	0	0	0,17	400,93	0,02	308,81	0	0,6
2029.	0	0	0	0	0	0	1,47	651,84	7,92	59,14	0,02	0,6
2030.	0	0	0	0	0	0	32,65	751,93	1,56	0	0,03	3,57

2031.	0	0	0	0	0	0	0	428,43	0,01	242,86	0	0,1
2032.	0	0	0	0	0	0	0	433,23	0	281,97	0	0
2033.	0	0	0	0	0	0	0	330,17	0	386,22	0	0
2034.	0	0	0	19,23	0	0	0	0,02	0	698,31	0	0,01
2035.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	718,72	0	0
2036.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2037.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2038.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2039.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2040.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2041.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2042.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2043.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2044.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2045.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2046.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2047.	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0
2048.	0	0	0	0	0	0	0,03	0	0	0	0	0
2049.	0	0	0	0	0	0	0,02	0	0	0,1	0,03	0
2050	0	0	0	0	0	0	0,04	0	0,02	0	0,02	0
UKUPNO	39,1	960,81	0,03	19,23	0	0	273,52	5464,15	225,85	4782,49	0,13	20,08

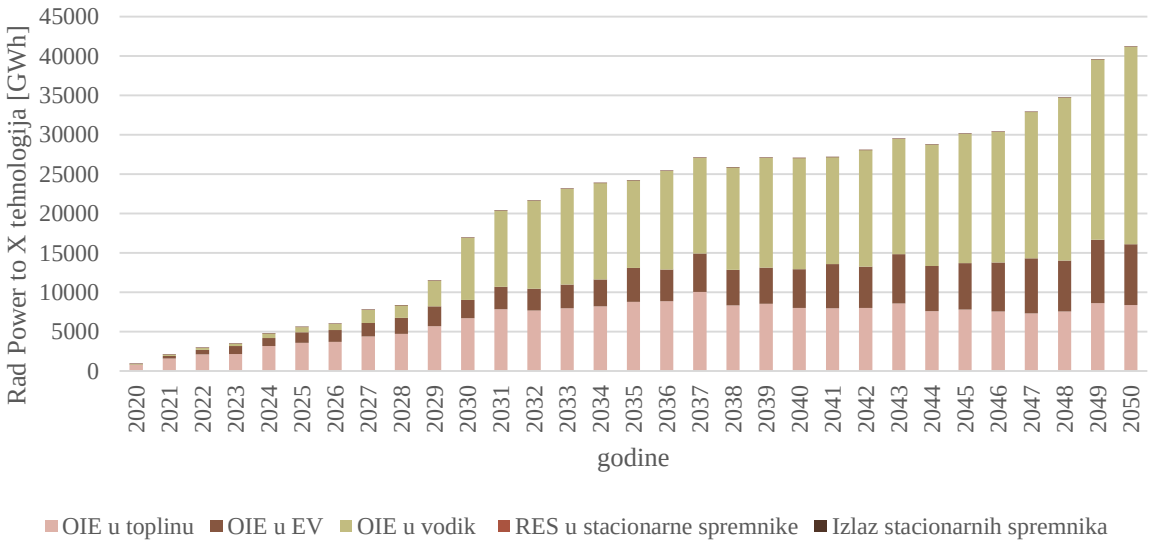
Instalirane kapacitete tehnologija koje pružaju fleksibilnost sustava prikazuje Tablica 15. Dominiraju alkalni elektrolizatori koji imaju najmanje troškove kod elektrolizatora i spremnici vodika, cjenovno najpristupačnija tehnologija fleksibilnosti sustava. Stacionarni spremnici nemaju velikih investicija, budući da su oni već zastupljeni u obliku baterija u električnim vozilima pa nema dodatne potrebe za novim kapacitetima.

Tablica 15. Ukupni instalirani kapaciteti u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena

	Alkalni elektrolizator [MW]	*PEM elektrolizator [MW]*	*SOEC elektrolizator [MW]*	*SOFC gorivni članci [MW]*	*PEMFC gorivni članci [MW]*	*Litij ionske baterije [MWh]*	*Spremnik vodika [MWh]*
2020.	0	0	0	0	0	0	0
2021.	0	0	0	0	0	0	83,66
2022.	9,95	0	0	0	0	0	81,1
2023.	13,26	0	0	0	0	0	90,62
2024.	45,86	0	0	0	0	0	32,19
2025.	23,3	0	0	0	0	0	77,32
2026.	24,09	0	0	0	0	0	75,74
2027.	154,5	0	0	0	0	0	0,04
2028.	1,19	0	0	0	0	0	71,58
2029.	282,71	0	0	0	0	0	35,43

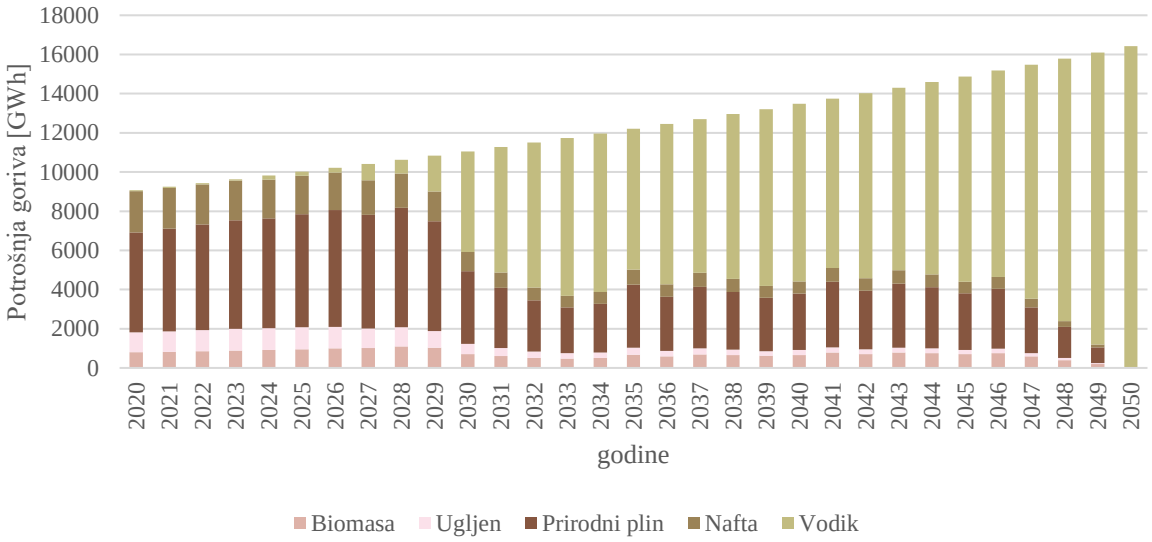
2030.	682,87	0	0	0	0	0	89,02
2031.	181,28	0	0	0	0	0	314,11
2032.	56,91	0	0	0	0	0	66,53
2033.	95,92	0	0	0	0	0	452,62
2034.	39,37	0	0	0	0	0	51,26
2035.	0,01	0	0	0	0	0,01	0
2036.	37,35	0	0	0	0	0	253,92
2037.	46,64	0	0	0	0	0	52,35
2038.	59,33	0	0	0	0	0	38,73
2039.	7,25	0	0	0	0	0	0,36
2040.	166,24	0	0	0	0	0	1503,99
2041.	23,3	0	0	0	0	0	0,32
2042.	46,7	0	0	0	0	0	271,24
2043.	46,23	0	0	0	0	0	585,08
2044.	68,29	0	0	0	0	0	0,04
2045.	44,8	0	0	0	0	0	0,1
2046.	153,84	0	0	0	0	0	663,55
2047.	584,08	0	0	0	0	0	7480,87
2048.	153,39	0	0	0	0	0	3825,8
2049.	36,04	0	0	0	0	0	19374,73
2050.	0,01	0,01	0,01	0	0	0,03	46367,67
UKUPNO	3084,71	0,01	0,01	0	0	0,04	81939,97

Kao što se moglo zaključiti iz instaliranih kapaciteta u tehnologije fleksibilnosti sustava, najviše viška proizvedene električne energije koristit će se za pohranu energije u obliku vodika i pretvorbu u toplinsku energiju. Osim toga, rastom udjela elektrificiranog transporta sve više električne energije se pohranjuje u električna vozila, kao što pokazuje Slika 66.



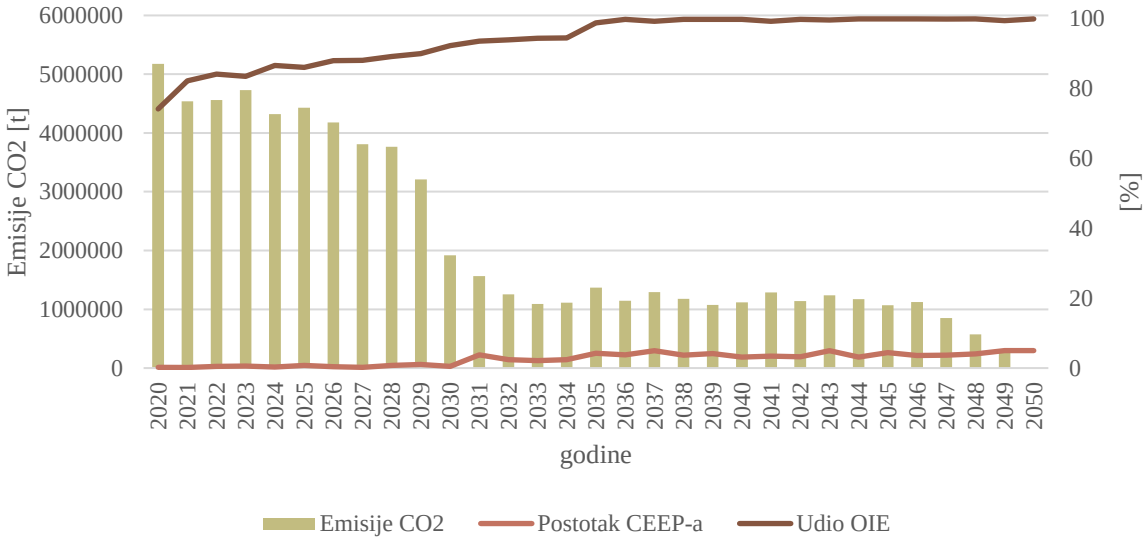
Slika 66. Rad Power to X tehnologija u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena

Potrošnja goriva u industriji, Slika 67., od početne zavisnosti na fosilna goriva, prebacuje se na vodik s potporom prirodnog plina sve do potpune klimatske neutralnosti u 2050. godini. Udjeli biomase ostaju uglavnom u istim okvirima u cijelom razdoblju.



Slika 67. Upotreba goriva u industriji u scenariju bez klimatskih promjena

Ciljevi strategije razvoja ostvareni su provedbom simulacije. Udio od 100% obnovljivih izvora energije, zbog visokih troškova goriva i cijena emisijskih jedinica, model postiže vrlo brzo i znatno prije 2050. godine. Usporedno tome, emisije CO_2 također značajno padaju u prvom dijelu promatranog razdoblja te se dovode na nulu do 2050. godine. CEEP se uspijeva držati unutar granica od 5%, kao što prikazuje Slika 68.



Slika 68. Prikaz ostvarenih ciljeva u scenariju bez klimatskih promjena

7.2. Rezultati scenarija očekivanog razvoja

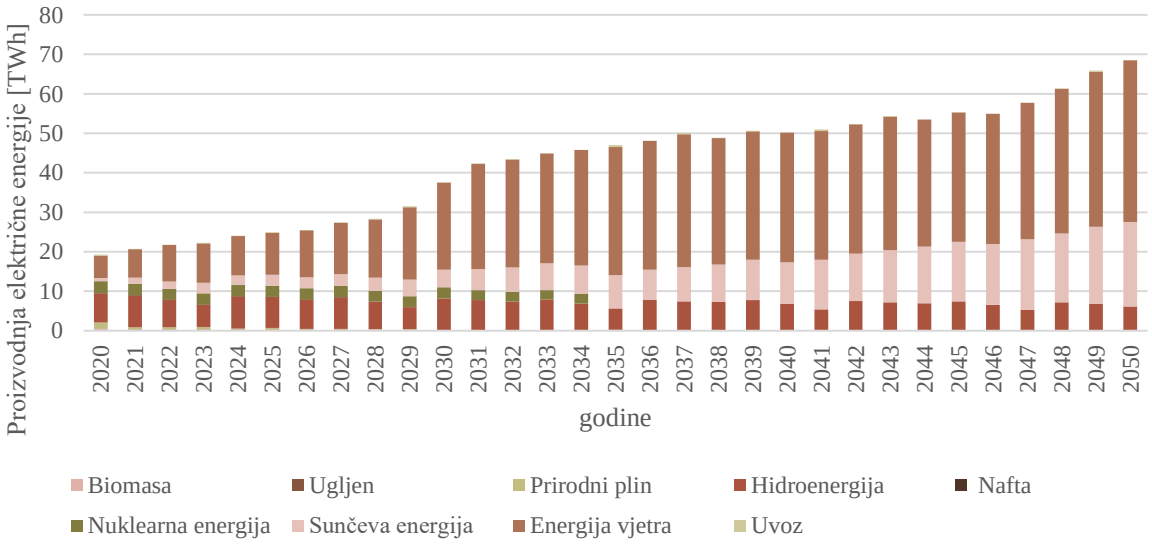
Simulacijom scenarija očekivanog razvoja klimatskih uvjeta do 2050. instalirani su proizvodni kapaciteti kako prikazuje Tablica 16. Do 2050. ukupno će se instalirati 13541 MW fotonaponskih elektrana i 12804 MW vjetroelektrana. Očekivano, kapaciteti se instaliraju u zonama s najvišim faktorima opterećenja.

Tablica 16. Instalirani proizvodni kapaciteti u scenariju očekivanog razvoja

[MW]	*HR_Solar1*	*HR_Solar2*	*HR_Wind1*	*HR_Wind2*	*HR_Wind3*	*HR_Wind4*
2020.	0	450	0	0	600	600
2021.	0	450	0	0	0	415,48
2022.	0	252,44	0	0	0	600
2023.	0	450	0	0	0	248,52
2024.	0	0	0	0	0	0
2025.	0	149,52	0	0	0	115,78
2026.	0	0	0	0	162	379,77
2027.	0	87,59	0	0	0	283,12
2028.	0	320,45	0	0	418,6	135,89
2029.	0	450	0	0	600	600
2030.	0	450	0,04	0	600	600
2031.	0	450	0	0	600	600
2032.	0	450	0	0	22,87	600
2033.	0	450	0	0	0	0
2034.	0	450	0	0	201,22	189,73
2035.	0	450	0	0	550,67	600
2036.	0	11,5	0	0	0	0

2037.	0	450	0	0	0	0
2038.	0	415,49	0	0	0	0
2039.	0	450	0	0	0	0
2040.	0	450	0	0	0	0
2041.	0	450	0	0	0	0
2042.	0	450	0	0	0	0
2043.	0	450	0	0	0	0
2044.	0	450	0	0	0	0
2045.	0	450	0	0	0	0
2046.	154,09	450	0	0	0	0
2047.	450	450	0,05	0	0	600
2048.	450	450	6,43	0	0,01	600
2049.	450	450	600	0	0	73,87
2050.	450	450	600	0	0	600
UKUPNO	1954,09	11586,99	1206,52	0	3755,37	7842,16

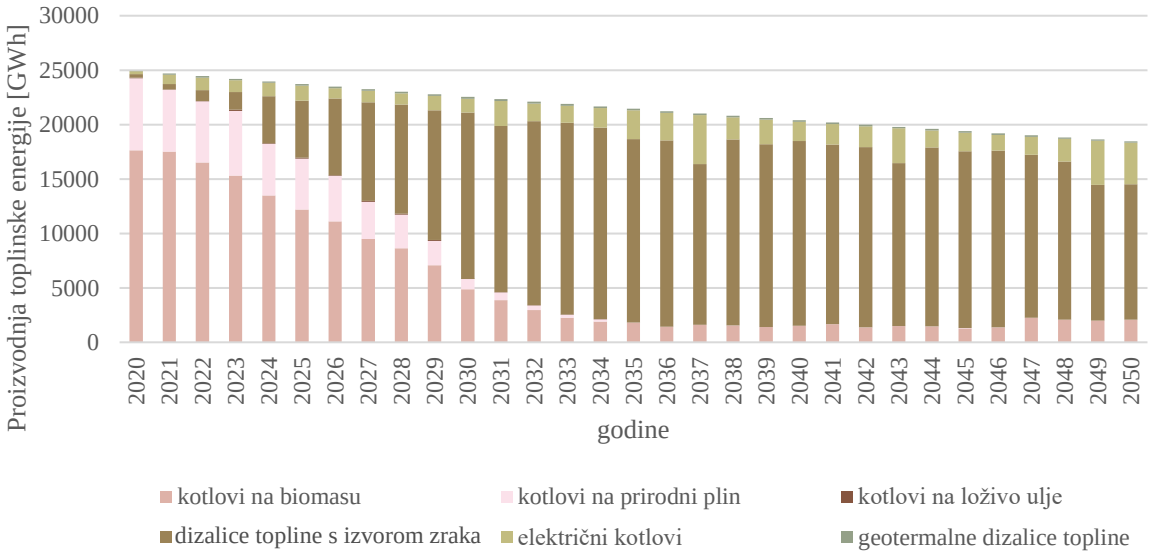
Slika 69. prikazuje udjele proizvodnje električne energije po gorivu do 2050. godine. Kao što je i zahtijevano, udjeli fosilnih goriva nestaju do 2050. postizanjem klimatske neutralnosti, dok se proizvodnja zasniva na obnovljivim izvorima energije, točnije energiji vjetra i sunčevoj energiji. Nuklearna energija također izlazi iz miksa nakon dekomisije nuklearne elektrane Krško, a hidroenergija se također značajno smanjuje, djelomično i zbog klimatskih promjena koje uzrokuju sve manje protoke hidroelektrana.



Slika 69. Proizvodnja električne energije u scenariju očekivanog razvoja

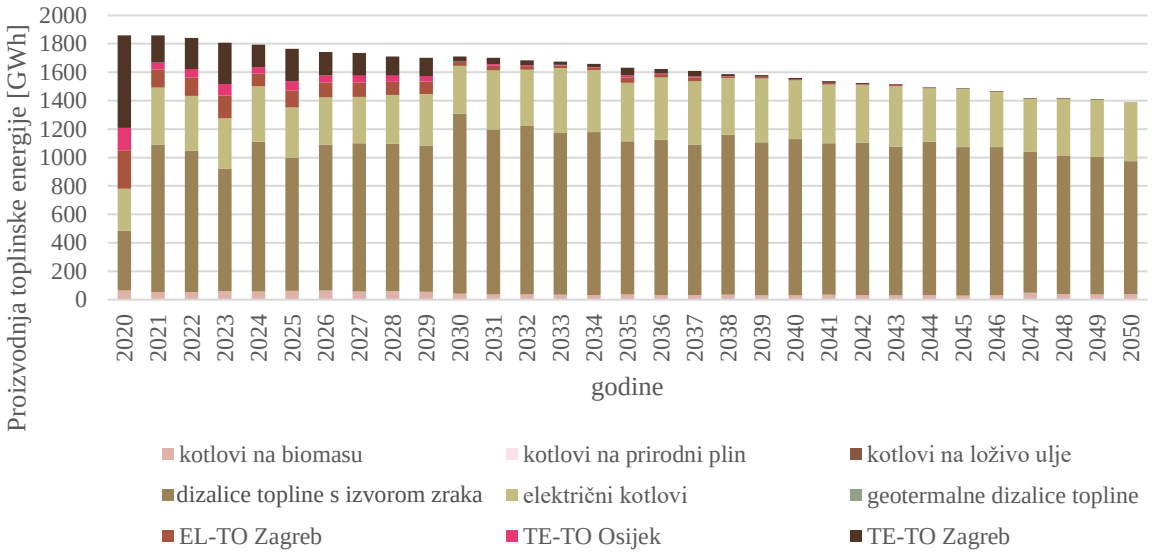
Rezultati toplinskog sustava prikazani su za individulano grijanje i centralizirani toplinski sustav. U individualnom grijanju, Slika 70., u početku prevladavaju kotlovi na biomasu i

prirodni plin. Nakon 2035., kotlovi na biomasu neće prelaziti 2000 GWh proizvedene toplinske energije godišnje, što iznosi do 10% godišnje proizvodnje, budući da ne zadovoljavaju emisijske standarde ciljeva dekarbonizacije sustava. Najveći porast vidi se kod dizalica topline s izvorom zraka i električnih kotlova. Dizalice topline s izvorom zraka bi u 2050. godini pokrivale 66% toplinskih potreba u individualnom sustavu grijanja.



Slika 70. Proizvodnja toplinske energije u individualnim sustavima grijanja u scenariju očekivanog razvoja

U centraliziranom sustavu grijanja u početnoj godini, Slika 71., većina toplinske energije se opskrbljuje iz kogeneracijskih postrojenja, međutim, već u sljedećoj godini model naglo povećava instalaciju i proizvodnju iz dizalica topline s izvorom zraka, zbog sve veće cijene emisijskih jedinica CO_2 i pada cijena dizalica topline. Međutim, vrlo je vjerojatno da će se unatoč tome postojeći kogeneracijski kapaciteti znatno dulje koristiti sve do njihove dekomisije u 2050. godini. Udio električnih kotlova također raste te će do 2050. iznositi oko 30% ukupne proizvodnje toplinske energije u centraliziranom toplinskom sustavu.



Slika 71. Proizvodnja toplinske energije u CTS-u u scenariju očekivanog razvoja

Konačno Tablica 17. prikazuje sve instalirane kapacitete za sektor toplinske energije. Uočava se da model odmah instalira nove kapacitete, zbog trendova velikih cijena goriva, visokog CO_2 otiska tradicionalnih goriva i pretpostavljenog pada troškova tehnologija.

Tablica 17. Ukupni instalirani kapaciteti za toplinske potrebe u scenariju očekivanog razvoja

[MW]	*kotlovi na biomasu*		*kotlovi na prirodni plin*		*kotlovi na loživo ulje*		*dizalice topline s izvorom zraka*		*električni kotlovi*		*geotermalne dizalice topline*	
	CTS	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**
2020.	51,21	353,6	0	0	0	0	127,77	0	194,02	0	0	0
2021.	0	486,1	0	0	0	0	94,47	0,02	20,68	0	0	10,8
2022.	0	109,08	0	0	0	0	0	117,04	0	85,94	0	0,8
2023.	0	0	0	0	0	0	0	204,8	0	776,33	0	0,8
2024.	0	0	0	0	0	0	1,48	714,4	0	268,02	0	0,8
2025.	0	0	0	0	0	0	0	434,03	0	549,68	0	0,8
2026.	0	0	0	0	0	0	5,5	519,25	0	187,98	0	0,6
2027.	0	0	0	0	0	0	0	497,78	0	210,72	0	0,6
2028.	0	0	0	0	0	0	0,33	396,48	0	313,26	0	0,6
2029.	0	0	0	0	0	0	0,02	628,81	0	82,17	0	0,6
2030.	0	0	0	0	0	0	44,13	793,48	0	0	0,02	3,59
2031.	0	0	0	0	0	0	0	404,22	0	225,51	0	0
2032.	0	0	0	0	0	0	0	408,97	0	306,23	0	0
2033.	0	0	0	0	0	0	0	398,8	0	317,59	0	0
2034.	0	0	0	10,11	0	0	0	1,99	0	705,47	0	0
2035.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	718,73	0	0
2036.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2037.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2038.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2039.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2040.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2041.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2042.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2043.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2044.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2045.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2046.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2047.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2048.	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0
2049.	0	0	0	0	0	0	0,02	0	0	0	0	0
2050	0	0	0	0	0	0	0,89	0	0	0	0	0
UKUPNO	51,2	948,8	0	10,11	0	0	274,6	5520,1	214,7	4747,6	0,02	19,99

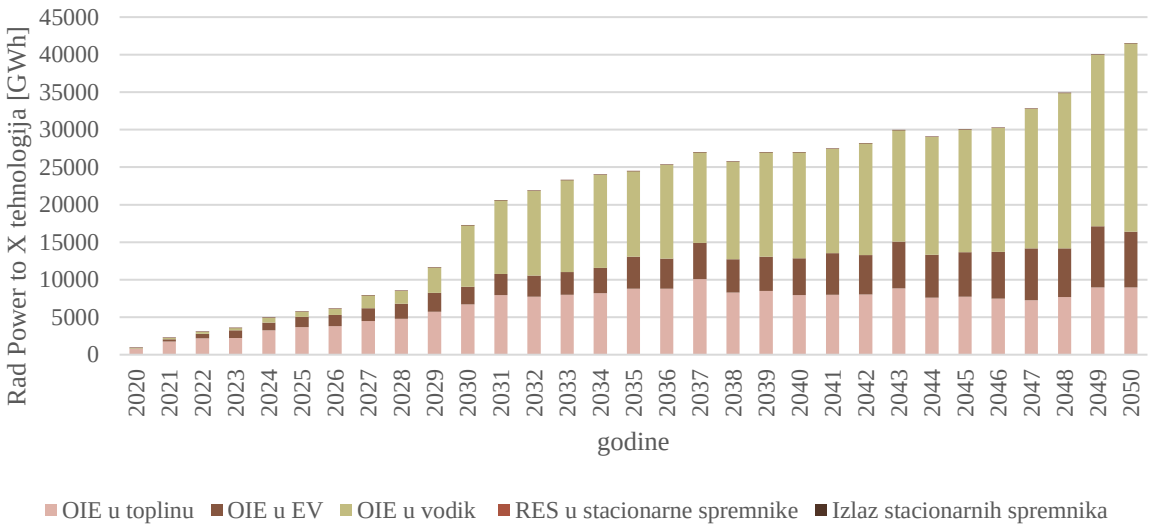
Tablica 18. prikazuje investicije u sustave pohrane energije i tehnologije vodika. Isključivo se investira u kapacitete alkalnih elektrolizatora zbog najnižih troškova tehnologije i u sustave pohrane vodika. Primjećuje se da do 2050. još ne postoji potreba za instaliranjem gorivnih članaka čime bi se omogućilo vraćanje energije pohranjene u vodiku natrag u mrežu. Baterije električnih vozila predstavljaju sustave pohrane električne energije te stoga nema potrebe za investicijama u stacionarne spremnike, u ovom slučaju litij – ionske baterije.

Tablica 18. Ukupni instalirani kapaciteti u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije u scenariju očekivanog razvoja

	Alkalni elektrolizator [MW]	*PEM elektrolizator [MW]*	*SOEC elektrolizator [MW]*	*SOFC gorivni članci [MW]*	*PEMFC gorivni članci [MW]*	*Litij ionske baterije [MWh]*	*Spremnik vodika [MWh]*
2020.	0	0	0	0	0	0	0
2021.	0	0	0	0	0	0	81,25
2022.	14,64	0	0	0	0	0	78,85
2023.	11,77	0	0	0	0	0	88,87
2024.	55,43	0	0	0	0	0	16,2
2025.	10,46	0	0	0	0	0	99,88
2026.	19,68	0	0	0	0	0	84,57
2027.	155,42	0	0	0	0	0	0,02
2028.	21,23	0	0	0	0	0	78,19
2029.	294,27	0	0	0	0	0	29,64
2030.	693,97	0	0	0	0	0	111,96
2031.	155,88	0	0	0	0	0	366,29
2032.	53,85	0	0	0	0	0	22,22
2033.	87,95	0	0	0	0	0	428,73
2034.	45,03	0	0	0	0	0	148,91
2035.	0	0	0	0	0	0	0,01

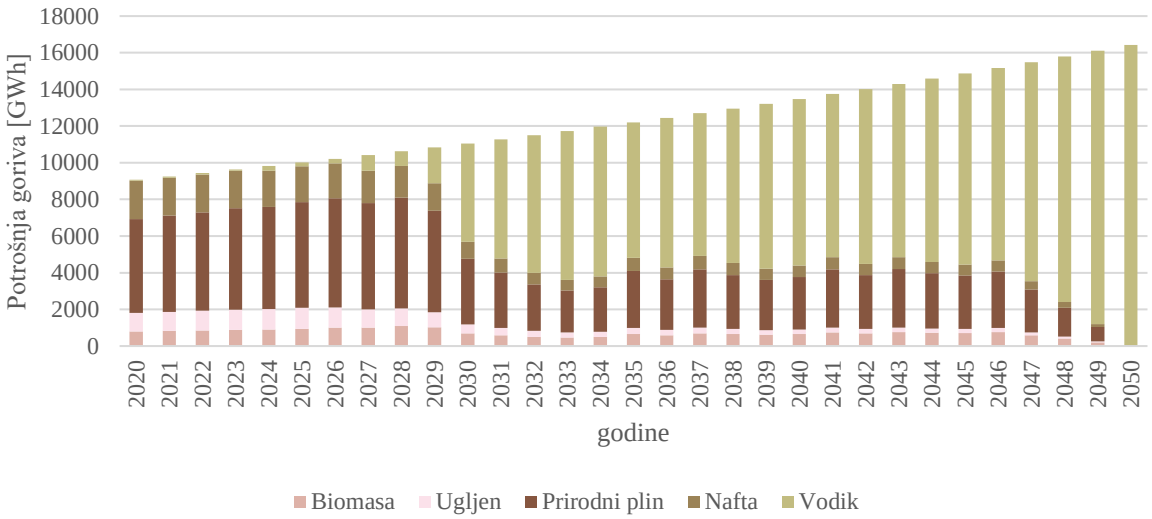
2036.	16,71	0	0	0	0	0	21,68
2037.	51,18	0	0	0	0	0	127,36
2038.	56,33	0	0	0	0	0	68,09
2039.	3,27	0	0	0	0	0	0,07
2040.	171,7	0	0	0	0	0	1640,91
2041.	77,26	0	0	0	0	0	297,88
2042.	5,58	0	0	0	0	0	0,09
2043.	78,09	0	0	0	0	0	804,86
2044.	63,79	0	0	0	0	0	0,01
2045.	23,52	0	0	0	0	0	0,01
2046.	159,84	0	0	0	0	0	447,49
2047.	486,87	0	0	0	0	0	7866,19
2048.	121,85	0	0	0	0	0	3668,73
2049.	0,03	0	0	0	0	0	17475,69
2050.	0	0	0	0	0	0	58757,09
UKUPNO	2935,6	0	0	0	0	0	92811,74

Višak električne energije se prvenstveno pretvara u toplinsku energiju u početku promatranog razdoblja, kako prikazuje Slika 72. Rastom udjela električnih vozila, do 85% u 2050., i vozila na vodik, 15% u 2050., postepeno se povećava i upotreba električne energije u tim tehnologijama fleksibilnosti sustava. Veliki rast pretvorbe električne energije proizlazi iz sve veće upotrebe vodika, primarno kao gorivo u industriji i vozilima na gorivne članke, ali i kao tehnologija fleksibilizacije sustava.



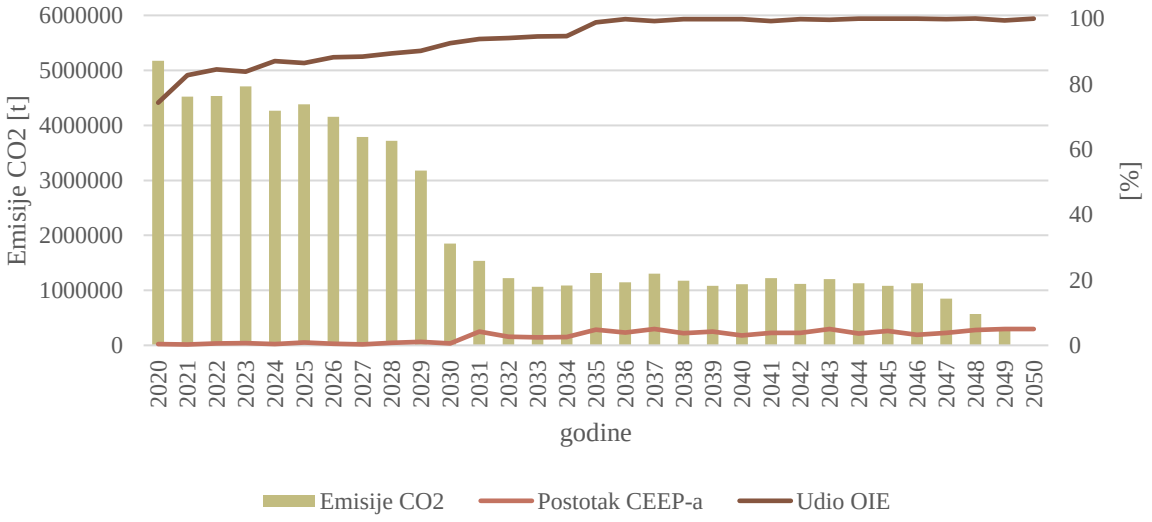
Slika 72. Rad Power to X tehnologija u scenariju očekivanog razvoja

Potrošnja goriva u industriji od početne upotrebe fosilnih goriva prebacuje se na potpunu upotrebu vodika do 2050. godine, zbog ciljeva dekarbonizacije bez emisija CO_2 i nižih troškova u odnosu na upotrebu biomase. Odnos upotrebe goriva prikazuje Slika 73.



Slika 73. Upotreba goriva u industriji u scenariju očekivanog razvoja

Svi uvjeti provedbe scenarija su ispunjeni tijekom simulacije. Kako prikazuje Slika 74., emisije CO_2 su se svele na nulu do 20050. godine, čime se ostvarila klimatska neutralnost te su udjeli obnovljivih izvora energije od 100% postignuti znatno prije 2050. godine. Višak proizvedene električne energije se zadržao unutar granice od 5%.



Slika 74. Prikaz ostvarenih ciljeva u scenariju očekivanog razvoja

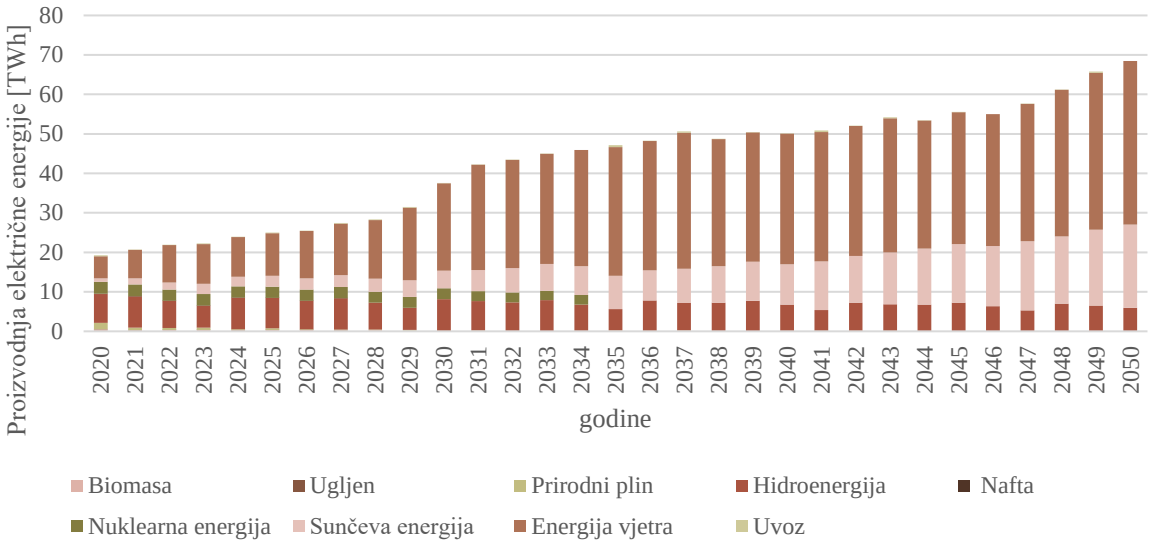
7.3. Rezultati scenarija s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

Tablica 19. prikazuje kako se i u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta najviše novih kapaciteta instalira u zonama HR_Solar2 i HR_Wind4. Ukupno se do 2050. instalira 13200 MW solarnih elektrana i 11707 MW vjetroelektrana.

Tablica 19. Instalirani proizvodni kapaciteti u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

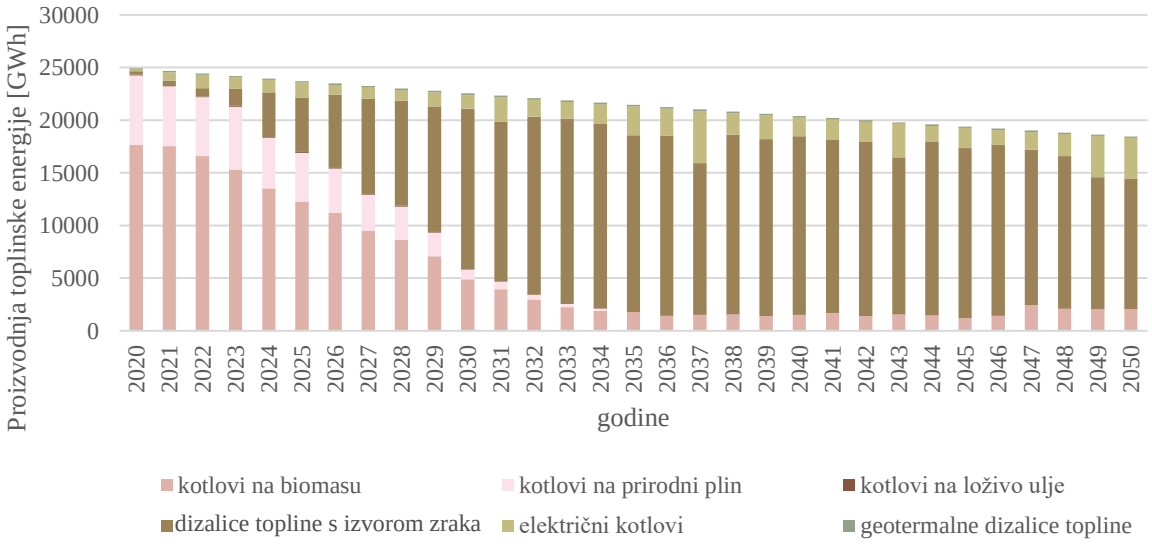
[MW]	HR_Solar1	HR_Solar2	HR_Wind1	HR_Wind2	HR_Wind3	HR_Wind4
2020.	0	450	0	0	600	600
2021.	0	450	0	0	0	429,68
2022.	0	256,18	0	0	0	600
2023.	0	450	0	0	0	254,68
2024.	0	0	0	0	0	0
2025.	0	143,29	0	0	0	120,06
2026.	0	0	0	0	193,35	344,6
2027.	0	93,56	0	0	0	285,51
2028.	0	300,08	0	0	395,88	154,46
2029.	0	450	0	0	600	600
2030.	0	450	0,2	0	600	600
2031.	0	450	0	0	600	600
2032.	0	450	0	0	23,5	599,99
2033.	0	450	0	0	0	0
2034.	0	450	0	0	223,27	210,56
2035.	0	450	0	0	552,72	599,99
2036.	0	0	0	0	0	0
2037.	0	449,98	0	0	0	0
2038.	0	257,08	0	0	0	0
2039.	0	450	0	0	0	0
2040.	0	450	0	0	0	0
2041.	0	450	0	0	0	0
2042.	0	450	0	0	0	0
2043.	0	450	0	0	0	0
2044.	0	450	0	0	0	0
2045.	0	450	0	0	0	0
2046.	0	450	0	0	0	0
2047.	450	450	0,75	0	33,17	600
2048.	449,99	450	116,79	0	0,02	597,3
2049.	450	450	600	0	0	46,51
2050.	450	450	600	0	42,5	600
UKUPNO	1799,99	11400,17	1317,74	0	3864,41	7843,34

Kao i u prethodnim scenarijima proizvodnja električne energije se zasniva na OIE, prvenstveno energiji vjetra i sunca. Fosilna goriva se vrlo brzo izbacuju iz miksa, kao i nuklearna energija nakon dekomisije trenutno jedine nuklearne elektrane čija se energija uvozi. Proizvodnju prikazuje Slika 75.



Slika 75. Proizvodnja električne energije u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

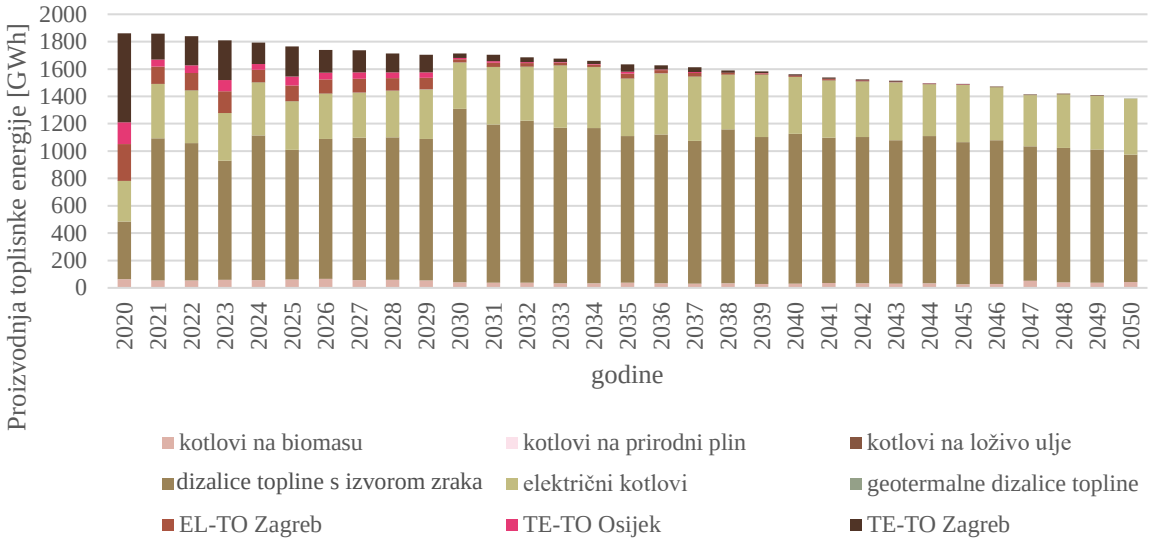
Proizvodnja toplinske energije u sustavima individualnog grijanja i dalje se temelji na dizalicama topline s izvorom zraka u kombinaciji s električnim i kotlovima na biomasu kako prikazuje Slika 76.



Slika 76. Proizvodnja toplinske energije u individualnim sustavima grijanja u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

Proizvodnja toplinske energije u centraliziranom toplinskom sustavu, Slika 77., i u ovom scenariju odmah počinje sa proizvodnjom iz dizalica topline s izvorom zraka. Trećinu pokrivaju

električni kotlovi, dok samo mali dio ostaje na kotlovima na biomasu. Kogeneracijska postrojenja imaju sve manju ulogu zbog instalacije dizalica topline i električnih kotlova, ali i zbog povoljnijih izvora električne energije kao što su varijabilni obnovljivi izvori energije.



Slika 77. Proizvodnja toplinske energije u CTS-u u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

Tablica 20. prikazuje instaliranje kapaciteta u sustavima opskrbe toplinskom energijom. Kao i u prethodnim scenarijima, novi kapaciteti se instaliraju u prvom djelu promatranog razdoblja. Fosilna goriva se skoro potpuno ne koriste.

Tablica 20. Ukupni instalirani kapaciteti za toplinske potrebe u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

[MW]	*kotlovi na biomasu*		*kotlovi na prirodni plin*		*kotlovi na loživo ulje*		*dizalice topline s izvorom zraka*		*električni kotlovi*		*geotermalne dizalice topline*	
	CTS	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**	**CTS**	**Ind**
2020.	45,65	353,48	0,03	0	0	0	128,23	0	193,97	0	0,04	0
2021.	0	486,78	0	0	0	0	95,46	0,48	21,17	0	0	10,8
2022.	0	109,08	0	0	0	0	0	80,01	0	121,95	0	0,8
2023.	0	0	0	0	0	0	0,01	236,61	0	744,51	0	0,8
2024.	0	0	0	0	0	0	2,86	700,43	0	281,99	0	0,8
2025.	0	0	0	0	0	0	0,02	447,57	0	536,14	0	0,8
2026.	0	0	0	0	0	0	3,73	523,49	0	183,74	0	0,6
2027.	0	0	0	0	0	0	0,07	500,22	0	208,27	0	0,6
2028.	0	0	0	0	0	0	0,35	395,81	0	313,93	0	0,6
2029.	0	0	0	0	0	0	0,45	625,02	0	85,96	0	0,6

2030.	0	0	0	0	0	0	42,76	789,35	0	0	0,07	3,52
2031.	0	0	0	0	0	0	0,03	408,3	0	225,62	0,01	0,01
2032.	0	0	0	0	0	0	0	411,49	0	303,7	0	0,01
2033.	0	0	0	0	0	0	0	399,06	0	317,32	0	0,01
2034.	0	0	0	0,02	0	0	0	14,87	0	702,49	0	0,01
2035.	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0	718,7	0	0,02
2036.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2037.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2038.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2039.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2040.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2041.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2042.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2043.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2044.	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0
2045.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2046.	0	0	0	0	0	0	0,02	0	0	0	0	0
2047.	0	0	0	0	0	0	0,04	0,01	0	0	0,03	0
2048.	0	0	0	0	0	0	0,03	0	0	0	0,04	0,02
2049.	0	0	0	0	0	0	0,08	0,01	0	0	0,04	0,01
2050	0	0	0	0	0	0	0,93	0,01	0,01	0,01	0,06	0,01
UKUPNO	45,65	949,34	0,03	0,02	0	0	275,08	5532,76	215,15	4744,33	0,29	20,02

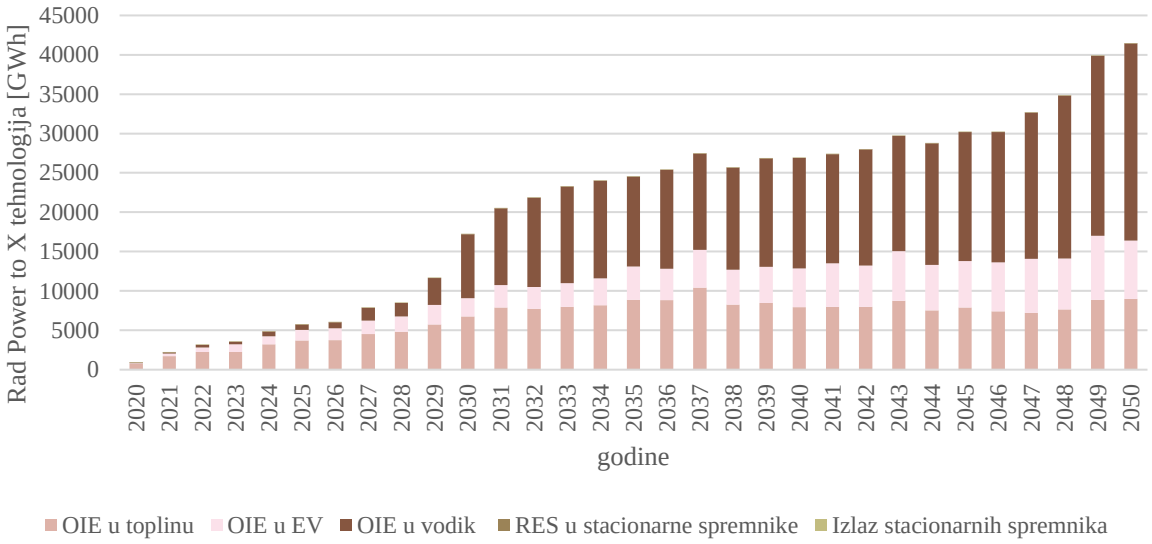
Kao i u prethodnim scenarijima najviše se instaliraju alkalni elektrolizatori i spremnici vodika za pružanje fleksibilnosti sustava. Ipak, Tablica 21. prikazuje kako u ovom scenariju dolazi i do najviše instalacija ostalih tehnologija, no svejedno zanemarivo u odnosu na spremnike vodika i alkalne elektrolizatore.

Tablica 21. Ukupni instalirani kapaciteti u sustave proizvodnje vodika i pohrane energije u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

	Alkalni elektrolizator [MW]	*PEM elektrolizator [MW]*	*SOEC elektrolizator [MW]*	*SOFC gorivni članci [MW]*	*PEMFC gorivni članci [MW]*	*Litij ionske baterije [MWh]*	*Spremnik vodika [MWh]*
2020.	0	0	0	0	0	0	0
2021.	0,01	0	0	0	0	0	80,44
2022.	17,54	0	0	0	0	0	83,15
2023.	8,74	0	0	0	0	0	85,63
2024.	46,28	0	0	0	0	0	31,34
2025.	22,4	0	0	0	0	0	79,11
2026.	15,25	0	0	0	0	0	93,42
2027.	145,64	0,01	0	0	0	0	0,02
2028.	34,55	0,01	0	0	0	0	72,92
2029.	295,06	0,01	0	0	0	0	31,47

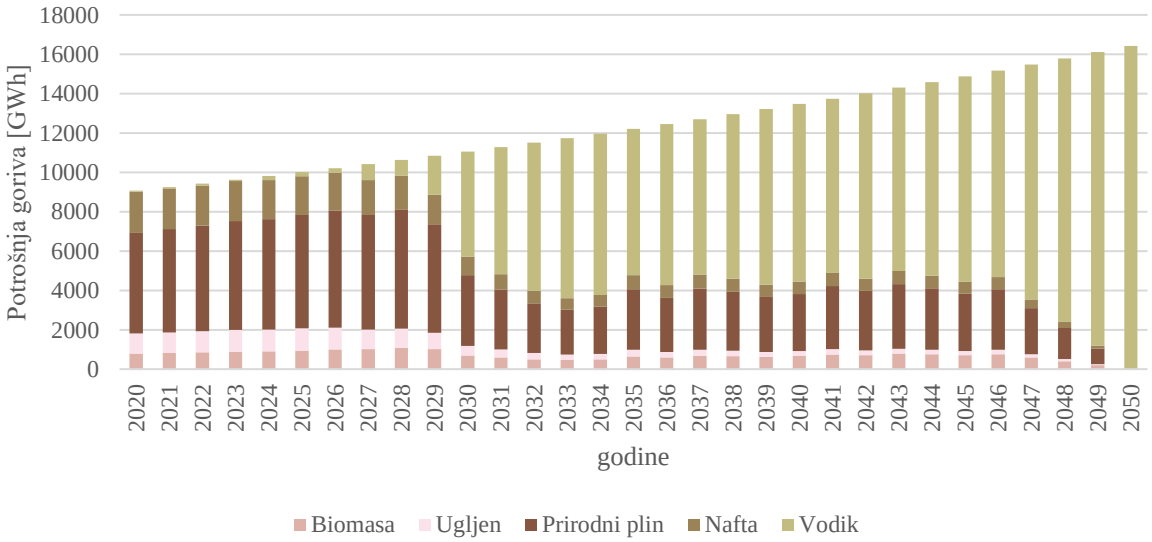
2030.	688,89	0,01	0	0	0	0	111,93
2031.	158,42	0	0	0	0	0	377,69
2032.	53,5	0	0	0	0	0	35,74
2033.	89,95	0	0	0	0	0	405,58
2034.	43,33	0	0	0	0	0	159,67
2035.	0,03	0	0	0	0	0,02	0,02
2036.	20,45	0	0	0	0	0	12,92
2037.	42,51	0	0	0	0	0	149,1
2038.	53,06	0	0	0	0	0	0,04
2039.	0,43	0	0	0	0	0	0,2
2040.	171,25	0,01	0	0	0	0	1561,95
2041.	71,78	0,02	0	0	0	0	263,17
2042.	9,26	0,01	0	0	0	0	0,48
2043.	62,63	0,01	0	0	0	0,01	816,29
2044.	76,78	0	0	0	0	0	0,04
2045.	28,25	0,01	0	0	0	0,02	0,07
2046.	158,99	0,02	0,01	0	0	0	664,38
2047.	464,32	0,01	0	0	0	0,01	8014,11
2048.	160,16	0,02	0,02	0	0	0,02	3866,67
2049.	1,54	0,06	0,03	0,01	0,01	0,04	18400,71
2050.	0,06	0,03	0,04	0,01	0,01	0	56319,85
UKUPNO	2941,06	0,24	0,1	0,02	0,02	0,12	91718,11

Rad Power to X tehnologija, Slika 78., se temelji na pretvorbi viška električne energije u toplinu ili se pohranjuje u spremnicima električnih vozila ili u obliku vodika. Prvo prevladava najpovoljnija tehnologija, odnosno pretvorba u toplinu, zatim električna vozila te na kraju najskuplja tehnologija pohranjivanja u vodik, koja je i najpoželjnije jer osim za fleksibilizaciju, vodik se koristi i u procesima industrije i transportu.



Slika 78. Rad Power to X tehnologija u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

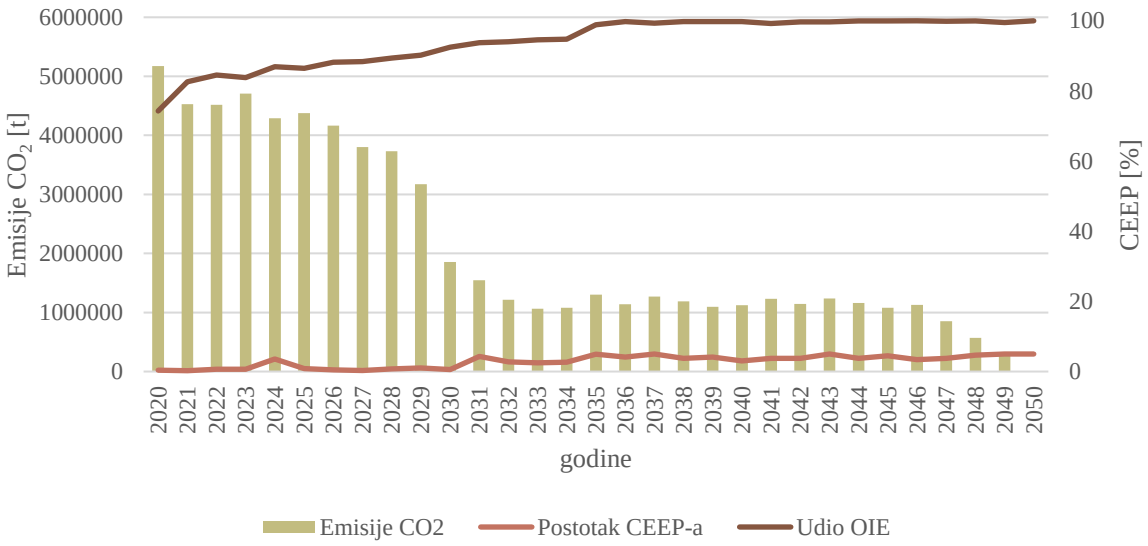
Industrija postepeno prelazi sa upotrebe fosilnih goriva na vodik. Prirodni plin sadrži najveći udio u potrošnji fosilnih goriva sve do 2050. godine kada je cilj postizanje nula emisija CO_2. Upotrebu goriva prikazuje Slika 79.



Slika 79. Upotreba goriva u industriji u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

Svi ciljevi provedbe simulacije su zadovoljeni. Emisije se do 2050. svedu na nulu, CEEP se drži u granicama od 5%, a udjeli obnovljivih izvora energije postižu 100% i prije traženog

razdoblja, kako prikazuje Slika 80. Ukupne granice emisija su niže nego u stvarnosti, budući da model ne razmatrana cijeli sustav, već samo elektroenergetski, toplinski, sektor industrije i dio transporta.



Slika 80. Prikaz ostvarenih ciljeva u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

7.4. Usporedba scenarija

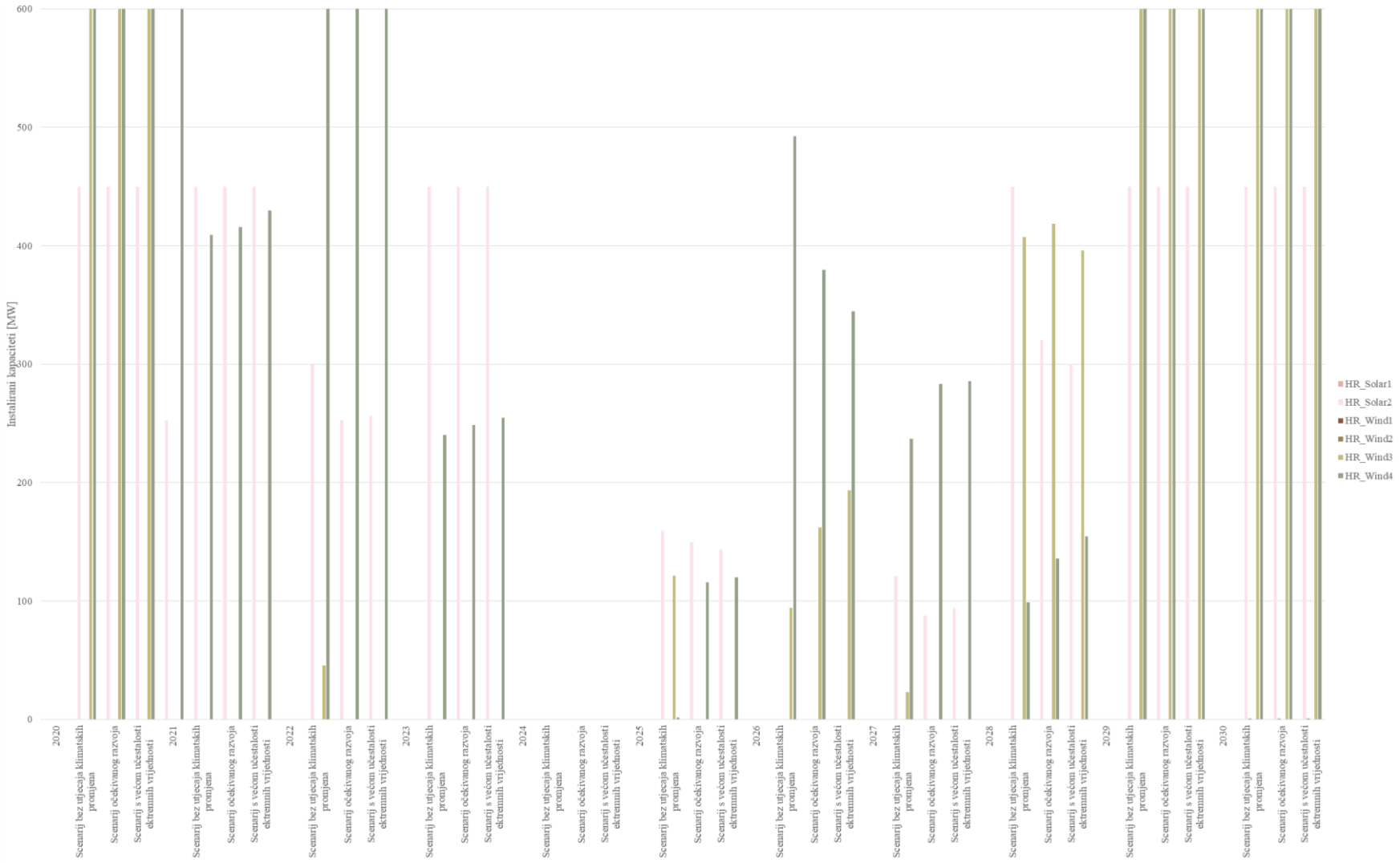
Ovdje su dane usporedbe glavnih pokazatelja razvoja sustava za sva tri provedena scenarija. Tablica 22. prikazuje instalirane ukupne kapacitete za svaki scenarij. Sva tri scenarija su se odmah u početnom razdoblju okrenula kapacitetima obnovljivih izvora energije, tako da se potražnja energije u svim scenarijima vrlo brzo pokrivala obnovljivim izvorima energije i bez velikih razlika u dinamici razvoja i odnosu udjela pojedinih tehnologija. Zanimljivo je primijetiti da je najviše instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora energije upravo u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena predviđenih klimatskim modeliranjem. S druge strane, u scenariju s ekstremnim uvjetima, dolazi do najvećeg instaliranja tehnologija koje omogućuju pohranu energije i fleksibilnost sustava. Povećani su kapaciteti pohrane vodika, kao i dizalica topline čime model osigurava sigurnost opskrbe toplinom, ali i vodikom u kritičnim satima. Zbog naglih varijacija i najvećih oscilacija meteoroloških parametra, scenarij s većom učestalosti ekstremnih uvjetima zahtjeva dodatne kapacitete pohrane viška proizvedene električne energije te jedini instalira nove kapacitete gorivnih članaka kako bi se energija pohranjena u vodiku mogla vratiti i u mrežu. Usporedbom instaliranih kapaciteta s potencijalom navedenim u energetskoj strategiji [5] vidi se da se instaliraju već kapaciteti nego utvrđeni

potencijal. Ova razlika proizlazi iz toga što se ovdje u obzir uzima i potencijal pučinskih vjetroelektrana, a instaliranje velikih kapaciteta fotonaponskih elektrana je posljedica podjele na zone primorske i kontinentalne Hrvatske koje imaju različite faktore opterećenja, ali su se koristili isti potencijali godišnje instalacije. Zbog zasićenja instalacija u zoni primorske Hrvatske, model je automatski prelazio na kontinentalnu zonu.

Tablica 22. Usporedba instaliranih kapaciteta po scenarijima

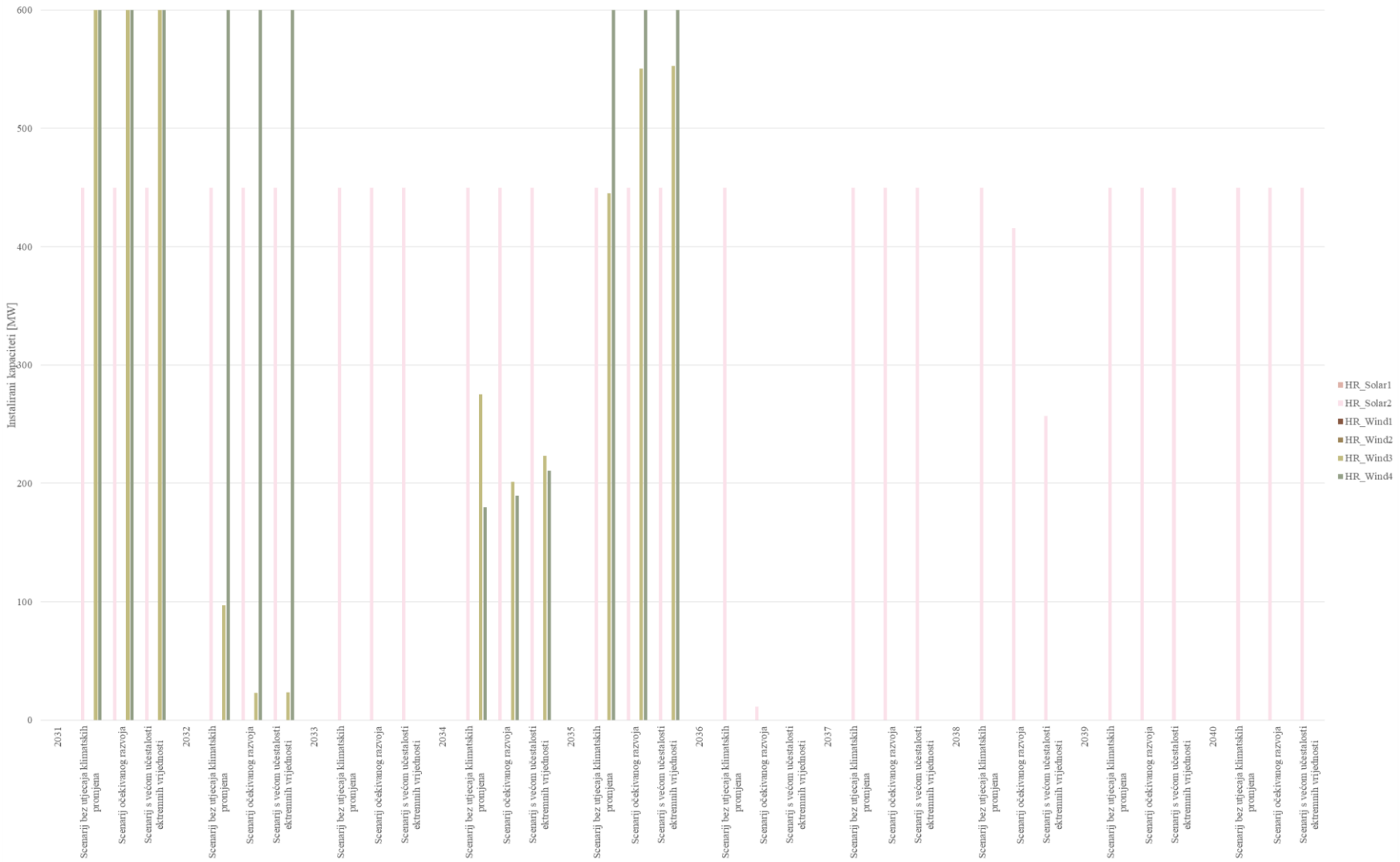
	Scenarij bez utjecaja klimatskih promjena	*Scenarij očekivanog razvoja*	*Scenarij s većom učestalosti ekstremnih uvjeta*
solarne elektrane [MW]	15023,93	13541,08	13200,16
vjetroelektrane [MW]	12523,1	12804,05	13025,49
kotlovi na biomasu [MW]	999,91	1000	949,99
kotlovi na fosilna goriva [MW]	19,26	10,11	0,05
električni kotlovi [MW]	5008,34	4962,2	4959,48
dizalice topline [MW]	5757,88	5814,71	5828,15
elektrolizatori [MW]	3084,73	2935,6	2941,3
gorivni članci [MW]	0	0	0,12
stacionarni spremnici [MWh]	0,04	0	0,12
spremnici vodika [MWh]	81939,97	92811,74	91718,11

U scenarijima s utjecajem klimatskih promjena dolazi do povećanja proizvodnje iz vjetra, što model prepoznaje i instalira veće kapacitete u tim scenarijima, u odnosu na fotonaponske elektrane čija instalacija prevladava u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena. Faktor opterećenja za vjetroelektrane je veći nego kod fotonaponskih, tako da je za istu proizvodnju potrebna manja ukupna snaga kod vjetroelektrana u odnosu na solarne elektrane. Važno je i napomenuti da navedeni kapaciteti ne predstavljaju istovremeno aktivne kapacitete, budući da se u obzir uzima i dekomisija postrojenja nakon određenog razdoblja. Slika 81. prikazuje usporedbu instaliranih kapaciteta solarnih i vjetroelektrana od 2020. do 2030. godine. Ovo razdoblje predstavlja najdinamičnije razdoblje instalacije kapaciteta, budući da model što prije želi prijeći na cjenovno prihvatljivije opcije opskrbe. U prvom dijelu razdoblja se instaliraju većinom maksimalno mogući kapaciteti u svim scenarijima, dok u drugom razdoblju instalacija više varira. Najviše se instalira u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena, budući da u scenarijima koji u obzir uzimaju klimatsko modeliranje dolazi do povećanja faktora opterećenja resursa energije vjetra i sunca.

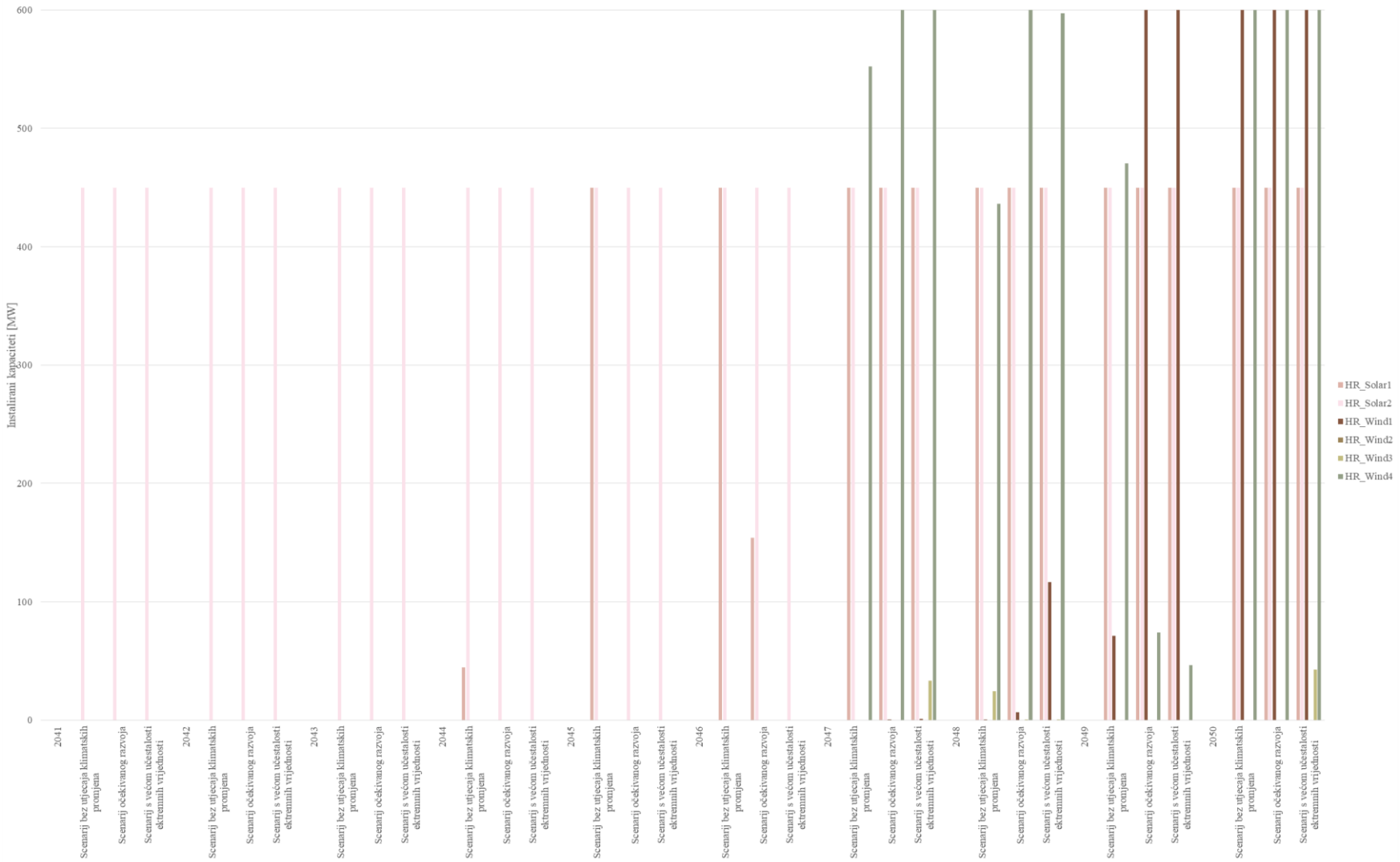


Slika 81. Instalirani kapaciteti po scenarijima od 2020. do 2030. godine

Slika 82. prikazuje usporedbu instaliranih kapaciteta fotonaponskih i vjetroelektrana u svim scenarijima od 2031. do 2040. godine. Ovo razdoblje karakterizira konstantna instalacija maksimalnih kapaciteta fotonaponskih elektrana u sva tri scenarija u zoni HR_Solar2 koja predstavlja područje primorske Hrvatske. Te fotonaponske elektrane koriste se kao bazna tehnologija koja održava dovoljne kapacitete proizvodnje energije, budući da je cjenovno najpovoljnija i s većim faktorom opterećenja nego fotonaponske elektrane u drugoj zoni. Takva razdioba instalacije se nastavlja i u prvoj polovici sljedećeg desetljeća kako prikazuje Slika 83. Nakon toga ponovno dolazi do većih investicija u sve tehnologije jer dolazi do dekomisije kapaciteta instaliranih na početku ukupno promatranog razdoblja u 2020. godini.

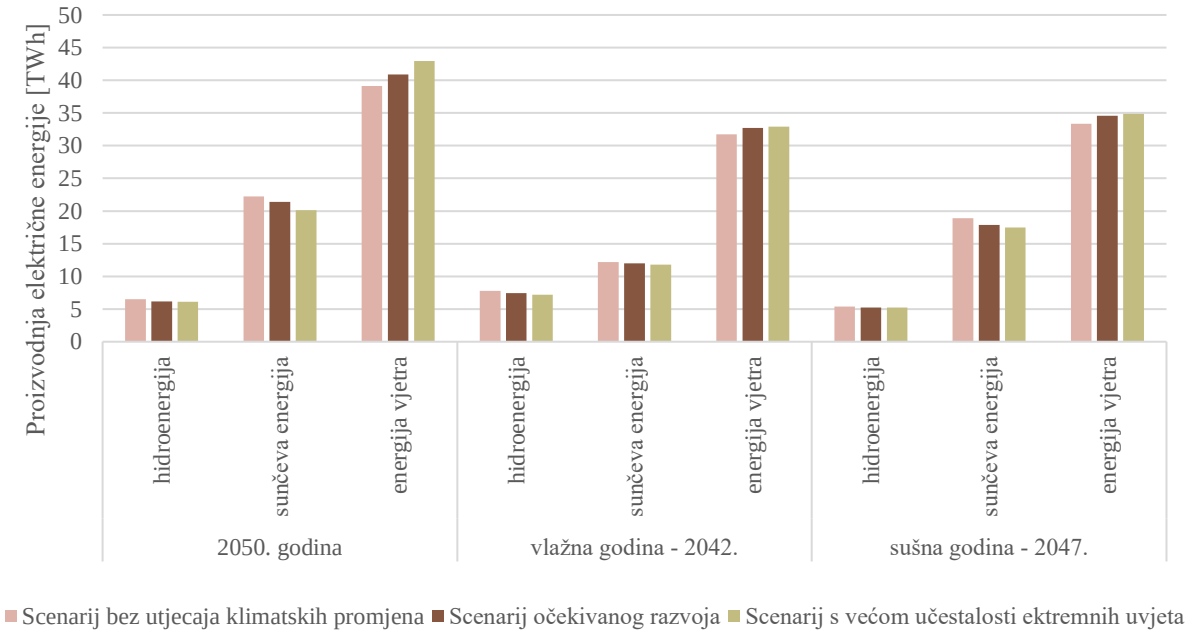


Slika 82. Instalirani kapaciteti po scenarijima od 2031. do 2040. godine



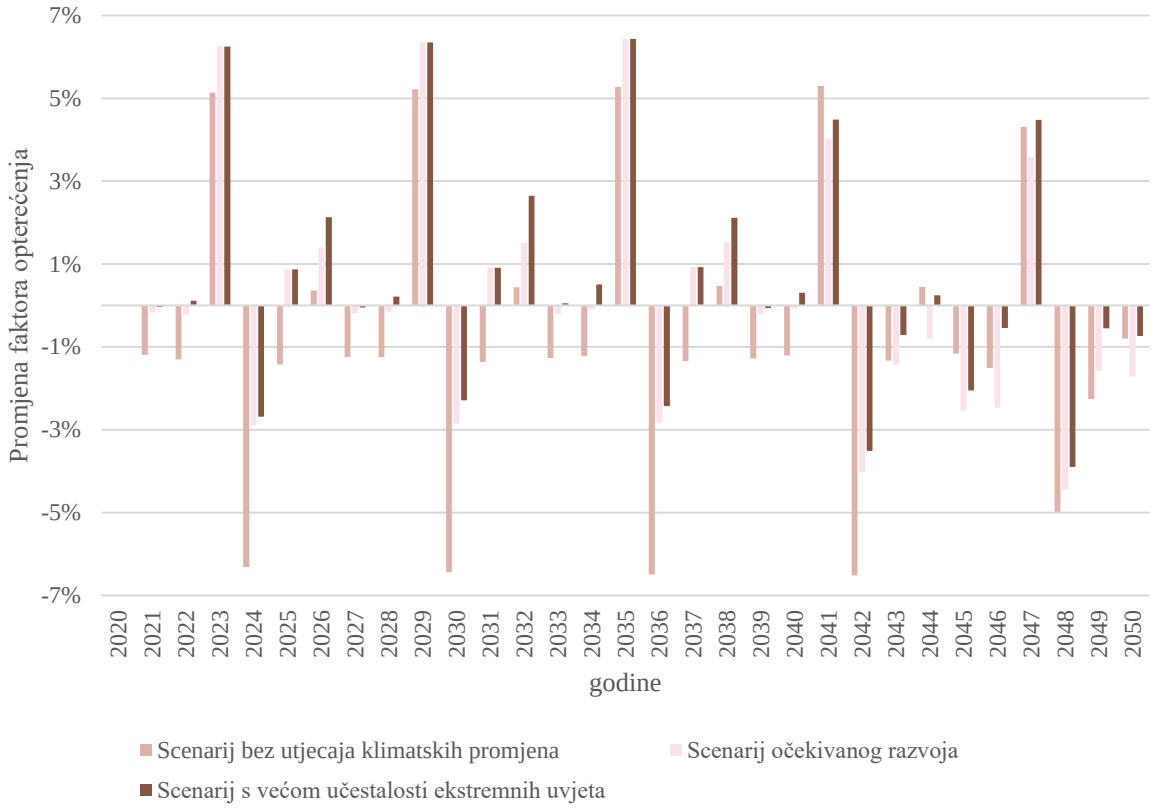
Slika 83. Instalirani kapaciteti po scenarijima od 2041. do 2050. godine

Slika 84. prikazuje usporedbu proizvodnje električne energije iz fotonaponskih i vjetroelektrana po scenarijima u krajnjoj 2050., karakterističnoj vlažnoj (2042.) i suhoj (2047.) godini. Vidi se kako u scenarijima gdje je veća proizvodnja iz vjetroelektrana, proizvodnja iz fotonaponskih elektrana je manja i obrnuto. Usporedbom sušne i vlažne godine, uočava se da u sušnoj godini opterećenje preuzimaju solarne elektrane, dok proizvodnja iz vjetroelektrana ostaje približno ista.



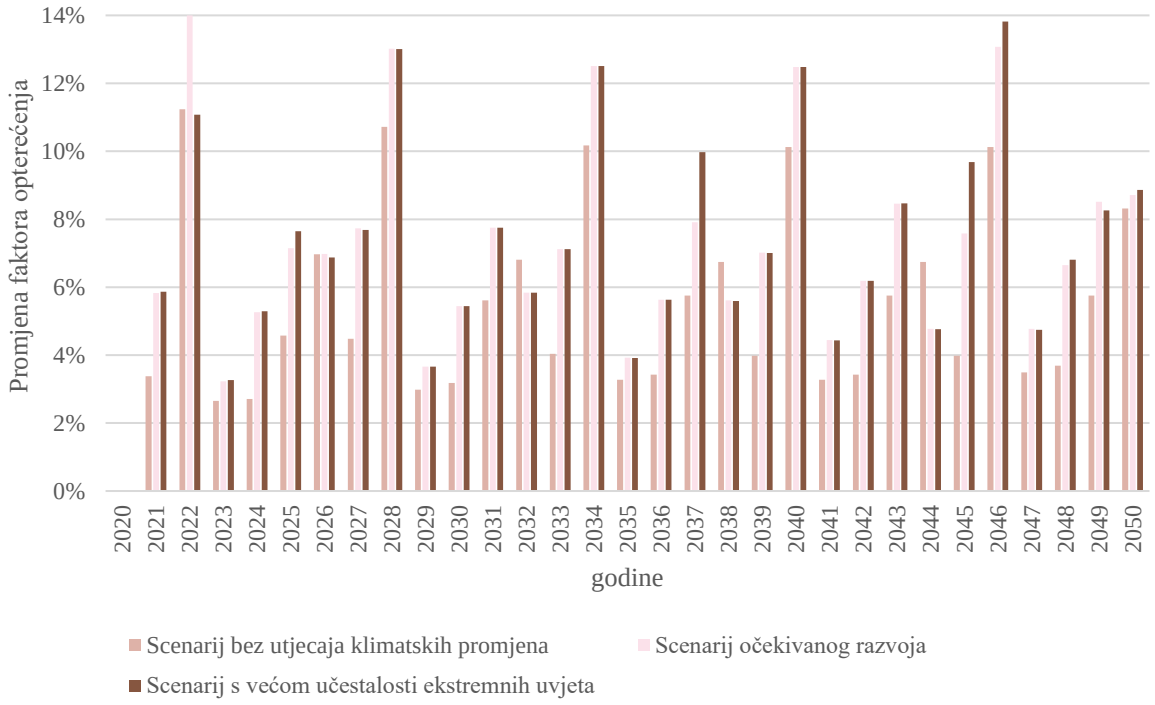
Slika 84. Usporedba proizvodnje po scenarijima iz fotonaponskih i vjetroelektrana za 2050., karakterističnu sušnu i vlažnu godinu

Slika 85. prikazuje promjenu prosječnog faktora opterećenja fotonaponskih elektrana u odnosu na 2020. godinu po scenarijima. Uopćava se sezonska razlika između dostupnosti resursa koja utječe na faktore opterećenja određene godine. Najveće oscilacije se primjećuju kod scenarija s većom učestalosti ekstremnih uvjeta i u razdoblju od 2040. do 2050. kada su i previđene najveće promjene dostupnosti resursa. Također, scenarij bez utjecaja klimatski promjena ima najmanje prosječne faktore opterećenja budući da u njemu nije primijenjeno klimatsko modeliranje koje previđaju povećanje, ili barem stagnaciju, u svim godišnjim dobima osim u zimi.



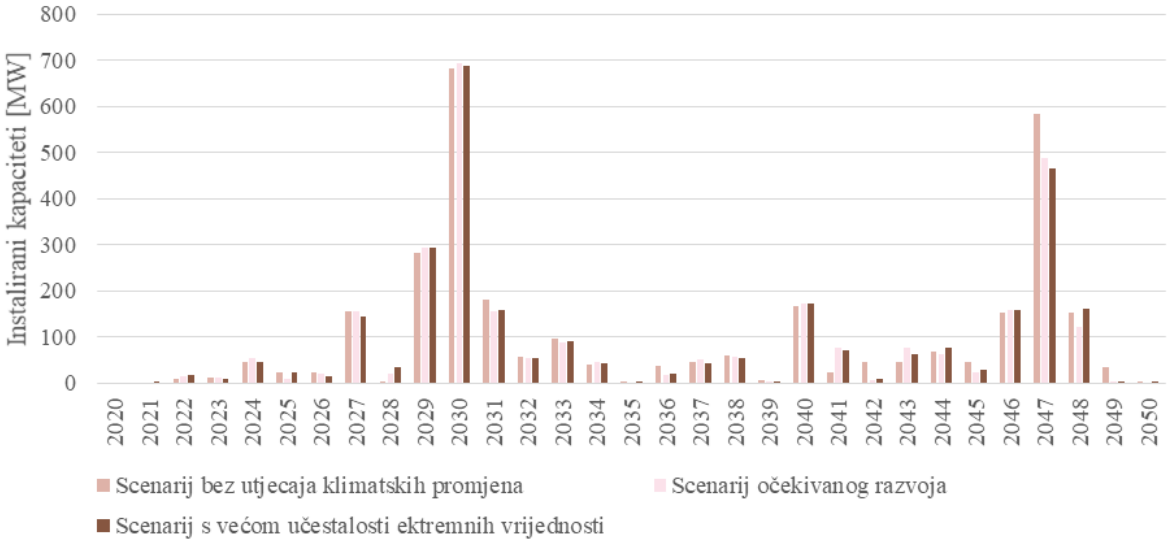
Slika 85. Promjena prosječnog faktora opterećenja za fotonaponske elektrane po scenarijima

Promjena prosječnog faktora opterećenja vjetroelektrana u odnosu na 2020. godinu po scenarijima prikazuje Slika 86. U svim godinama u odnosu na 2020. dolazi do rasta prosječnog faktora opterećenja, kako zbog klimatskog modeliranja, tako i zbog instalacije novih kapaciteta vjetroelektrana, posebno pučinskih, koje imaju više vrijednosti faktora opterećenja u odnosu na kopnene. Klimatskim modelom previđeno je povećanje faktora opterećenja samo za zone HR_Wind3 i HR_Wind4, a u tim zonama dolazi i do najviše instalacija u scenarijima kako prikazuje Tablica 13., Tablica 16. i Tablica 19. Do posebnog povećanja dolazi u razdoblju od 2040. do 2050. godine kada se očekuje povećanje i do 20% u jesen za zonu pučinskih vjetroelektrana.



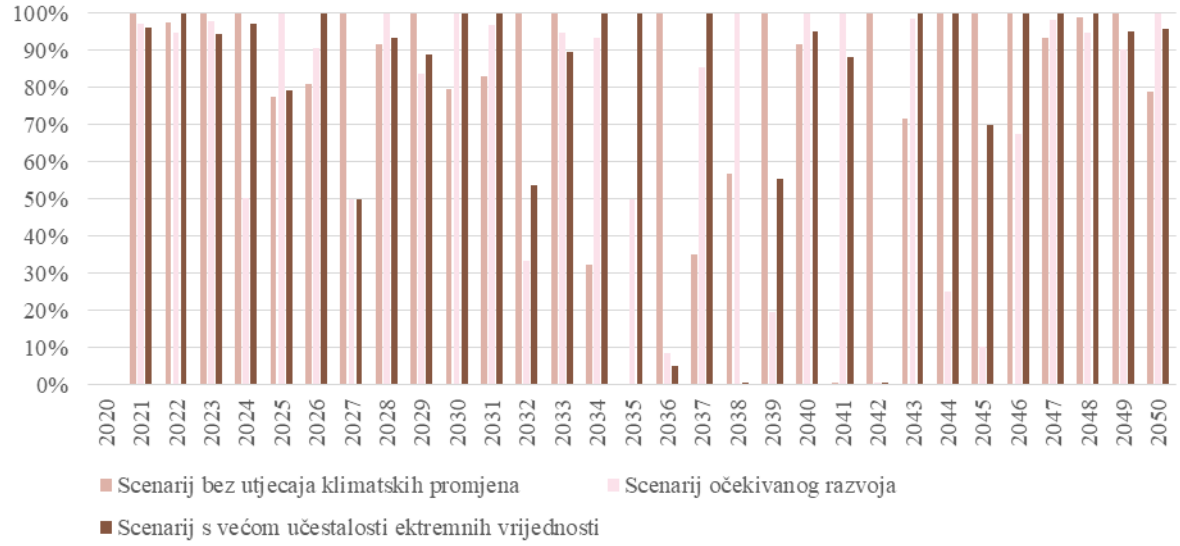
Slika 86. Promjena prosječnog faktora opterećenja za vjetroelektrane po scenarijima

Alkalni elektrolizatori predstavljaju tehnologiju s najviše instaliranih kapaciteta koja omogućuje fleksibilnost sustava. Slika 87. pokazuje da je najviše kapaciteta potrebno u prvom scenariju bez promjena i trećem scenariju s ekstremnim uvjetima. Prvi scenarij ima niže faktore opterećenja tijekom promatranog razdoblja te se zato instaliraju veći kapaciteti OIE i tehnologija fleksibilizacije sustava. S druge strane, treći scenarij ima veće faktore opterećenja, ali zbog naglih promjena u njihovoj dostupnosti, potrebno je više kapaciteta tehnologija fleksibilizacije koje bi osigurale dostatnu proizvodnju i u takvim uvjetima.



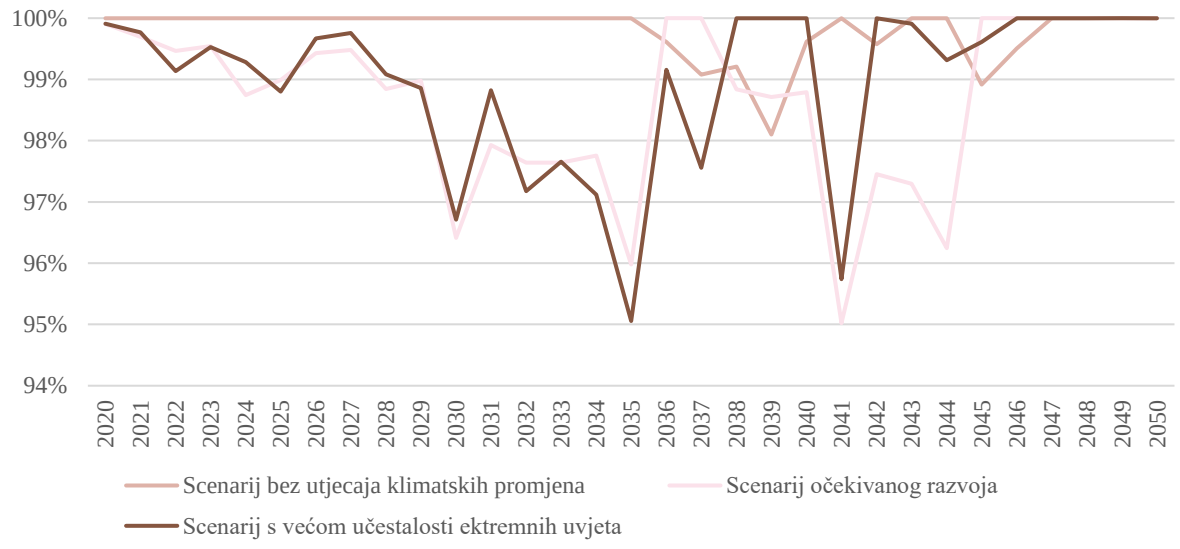
Slika 87. Instalirani alkalni elektrolizatori u svim scenarijima

Uz elektrolizatore, neophodni su spremnici vodika kako bi se postigla fleksibilnost sustava. Slika 88. prikazuje kako su ovisno o scenariju, potrebni različiti kapaciteti spremnika za pohranu viška proizvedene električne energije u vodik. Slika je prikazana s relativnim vrijednostima između scenarija zbog velikih razlika između godina. 100% označava maksimalnu vrijednost u određenoj godini između tri scenarija te se ostale vrijednosti uspoređuju s tom maksimalnom vrijednosti. Tablica 15., Tablica 18. i Tablica 21. prikazuju točne vrijednosti. Najveće oscilacije se primjećuju kod scenarija s većom učestalosti ekstremnih uvjeta.



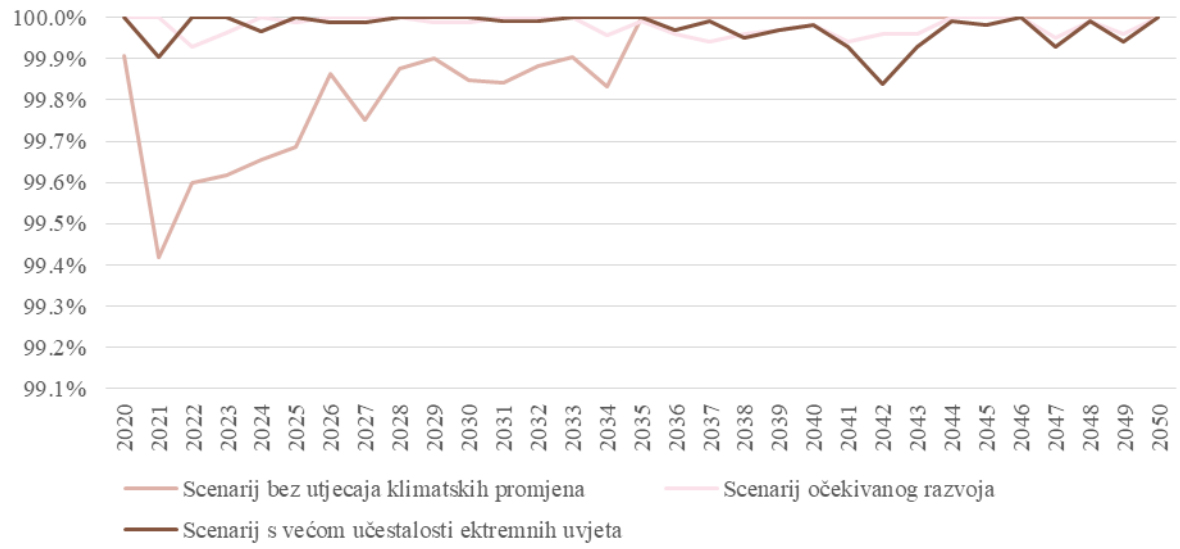
Slika 88. Razlike odnosa instalacije kapaciteta spremnika vodika po scenarijima

Svi scenariji ostaju unutar granica CO_2 tijekom godina. Slika 89. prikazuje razlike odnosa CO_2 emisija u scenarijima. I ovdje su prikazane relativne vrijednosti zbog malih razlika između scenarija. 100% označava maksimalnu vrijednost u određenoj godini između tri scenarija te se ostale vrijednosti uspoređuju s tom maksimalnom vrijednosti. Scenariji s utjecajem klimatskih promjena brže postižu ciljeve obnovljivih izvora energije, tako da imaju i manje emisije u odnosu na scenarij bez utjecaja klimatskih promjena. Na kraju sva tri scenarija postižu jednake vrijednosti od nula emisija CO_2.



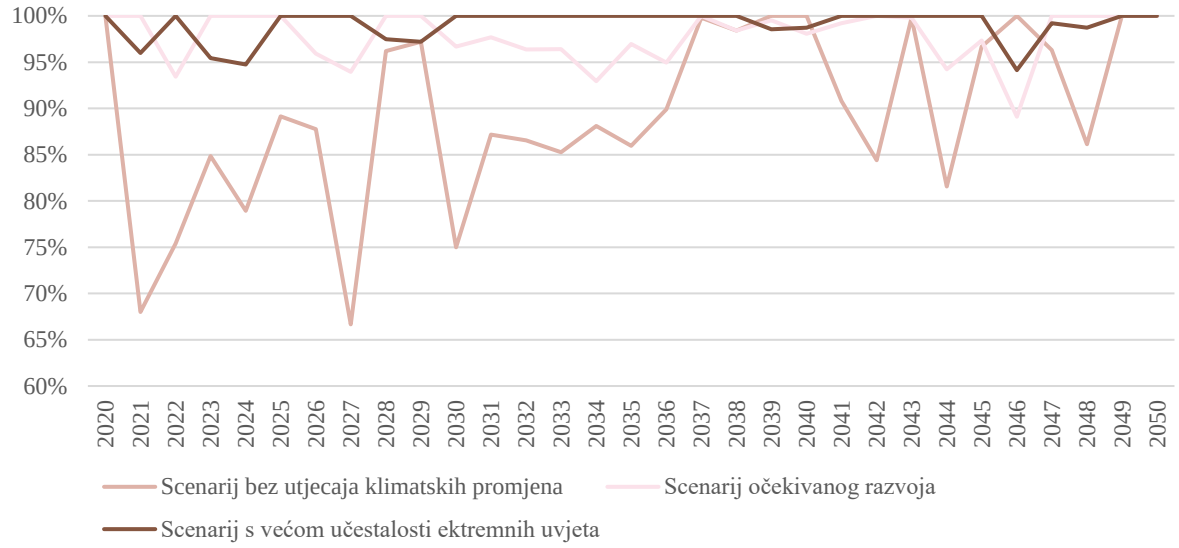
Slika 89. Usporedba emisija CO_2 po scenarijima

Naglim rastom instalacije obnovljivih izvora energije vrlo brzo se postiže 100% varijabilnih obnovljivih izvora energije: energija iz vjetra, sunca, biomase i iz hidroelektrana. Kako prikazuje Slika 90., u početku najmanji porast ima scenarij bez utjecaja klimatskih promjena, dok nakon 2035. godine on zadržava gotovo konstantnu vrijednost postizanja 100% OIE, dok scenariji s utjecajem klimatskih promjena imaju i nakon tog razdoblja ponešto oscilacija, a posebno scenarij s ekstremnim uvjetima. Ovdje se također koriste relativne vrijednosti radi male razlike između scenarija. 100% označava maksimalnu vrijednost u određenoj godini s kojom se uspoređuju vrijednosti ostalih scenarija. Apsolutne vrijednosti tijekom godina prikazuje Slika 68., Slika 74. i Slika 80.



Slika 90. Razlike odnosa obnovljivih izvora energije po scenarijima

Slika 91. prikazuje kako se CEEP razlikuje u odnosu na različite scenarije. Oscilacije u CEEP-u dijelom se mogu objasniti promjenama dostupnosti resursa. Kao što je i očekivano, najveći viškovi električne energije postižu se upravo u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta zbog svoje promjenjive dostupnosti resursa, i posljedično, slabije dimenzioniranosti energetskog sustava. Ove razlike mogu se pripisati oscilacijama u godišnjoj dostupnosti resursa ili različitim investicijama u tehnologije fleksibilnosti. Koriste se relativne vrijednosti radi male razlike između scenarija, gdje 100% označava maksimalnu vrijednost u određenoj godini s kojom se uspoređuju vrijednosti ostalih scenarija. Apsolutne vrijednosti za svaki scenarij prikazuje Slika 68. Slika 74. i Slika 80.



Slika 91. Odnosi CEEP-a po scenarijima

8. ZAKLJUČAK

Cilj Europske unije o postizanju klimatske neutralnosti, izazov je koji čini jednu od najvažnijih zajedničkih politika Europe. Osim toga, trenutni trendovi visokih cijena i nestabilnosti sigurne opskrbe fosilnim gorivima, predstavljaju ne samo ekološki, već i egzistencijalni problem koji utječe na svakog pojedinca. Iz navedenog, prelazak na obnovljive izvore energije predstavlja izgledni razvoj elektroenergetskih sustava.

Za razvoj takvih sustava, neophodno je pažljivo dimenzioniranje i sektorsko povezivanje u kojem bi i potrošač i proizvođač bio važan sudionik sustava. Tako je u ovom radu modeliran elektroenergetski sustav Republike Hrvatske kako bi se istražila mogućnost prelaska na obnovljive izvore uz podršku tehnologija koje omogućuju fleksibilnost sustava i to za nekoliko scenarija dostupnosti resursa u budućnosti. Izrađen je model elektroenergetskog sustava za 2020. godinu budući da za nju postoje povijesni podaci iz Energije u Hrvatskoj, Energetskog Instituta Hrvoje Požar [36]. Klimatskim modeliranjem Državnog hidrometeorološkog zavoda [33] istražene su prognoze kretanja meteoroloških parametra u budućnosti te su rezultati primijenjeni u ovom radu. Simulirala se svaka godina u satnim vrijednostima od 2020. do 2050. godine sa drugačijim krivuljama dostupnosti resursa za svaku godinu i svaki scenarij. Model je provedbom simulacije u svakom scenariju instalirao više od 12000 MW solarnih i 12000 MW vjetroelektrana u ukupnom promatranom razdoblju, ali nisu svi kapaciteti bili aktivni u isto vrijeme zbog kontinuirane dekomisije postrojenja. Također, investirano je u značajne kapacitete elektrolizatora, dizalica topline i spremnike vodika kako bi se sustav mogao prilagoditi uvjetima kada resursi obnovljivih izvora energije nisu dostupni. Prikazano je da se i u scenarijima gdje su u obzir uzete promjene meteoroloških uvjeta, odnosno promjene dostupnosti resursa, također može provesti tranzicija prema OIE s većim instaliranim tehnologijama fleksibilnosti i pohrane sustava. Stoga je dokazana otpornost sustava baziranog na OIE upotrebom različitih krivulja dostupnosti za svaku godinu s dodatnim promjenama dostupnosti resursa po scenarijima. Tehnologije fleksibilnosti uvelike doprinose ovakvom ishodu jer mogu uravnotežiti povremene nedostatke proizvodnje, ili velike potrošnje, što rezultira stabilnijim i otpornijim sustavom. Moguća veća razlika između otpornosti sustava u različitim scenarijima očekuje se tek potkraj stoljeća kada se očekuju veće klimatske modifikacije. Svi provedeni scenariji su zadovoljili zahtjeve klimatske neutralnosti i udjela od 100% varijabilnih OIE u energetskom miksu. Uz to, poštivalo se da prekomjerna proizvodnja električne energije ne prelazi 5%.

Modeli za dugoročno energetsko planiranje nikako ne predstavljaju pravi tijek razvoja energetskih sustava u budućnosti. Oni pružaju tehnički okvir koji, u ovom slučaju, pokazuje kako je energetski sustav baziran na obnovljivim izvorima energije u stvarnosti moguć, ali sama provedba osim o tehničkim ovisi i o nekoliko ostalih faktora: ekološkim, društveno-ekonomskim, legislativnim, ali i snažnoj društvenoj i državničkoj inicijativi koja bi preuzela odgovornost kretanja prema klimatskoj neutralnosti. Iz ove perspektive, H2RES predstavlja odličan alat u širenju i prikazivanju tehničkih mogućnosti energetskih sustava i okvirnih vrijednosti kapaciteta potrebnih za dostatnu, ali i sigurnu opskrbu energijom te pružaju sigurnost u predviđanju zadovoljavanja energetskih potreba i u nepredvidivim vremenskim uvjetima, pod utjecajem godišnjih varijacija ili dugoročnih klimatskih promjena. H2RES, kao program otvorenog koda ima mogućnost modeliranja svake godine drugačijim krivuljama u promatranom razdoblju, što je dostupno samo u komercijalno dostupnim modelima. Može dobro opisati specifične zahtjeve za promatrani slučaj i nadograditi postojeće opcije u željenom smjeru. Stoga se ovim radom prikazalo kako su trenutni ciljevi klimatske neutralnosti dohvatljivi uz sva postavljena ograničenja te bi se što brže trebalo krenuti prema implementaciji istih.

Tehnološki napredak čovjeka, već je omogućio prelazak na obnovljive izvore energije. Pitanje nije više kako, nego kada i tko će preuzeti pionirsku i povijesnu ulogu postizanja klimatske neutralnosti, kao ostavštine budućim generacijama.

LITERATURA

[1] *United Nations: The Paris Agreement* Dostupno na: https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/energy-union/ [10. svibanj 2022.]

[2] *Europsko vijeće: Energetska unija* Dostupno na: https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/energy-union/ [10. svibanj 2022.]

[3] *Europski parlament: Energetska politika: opća načela* Dostupno na: https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hr/sheet/68/energetska-politika-opca-nacela [10. svibanj 2022.]

[4] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Integrirani nacionalni energetski i klimatski plan za Republiku Hrvatsku za razdoblje od 2021. do 2030. godine, prosinac 2020., Dostupno na: https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug-4925/energetika/energetska-politika-i-planiranje/strategije-planovi-i-programi-2009/2009

[5] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, veljača 2020., Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_25_602.html

[6] Dominković, D.F., Bačeković, I., Ćosić, B., Krajačić, G., Pukšec, T., Duić, N., Markovska, N., Zero carbon energy system of South East Europe in 2050, Applied Energy, Volume 184, 2016, Pages 1517-1528, ISSN 0306-2619, Dostupno na: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.046.

[7] Welsch, M., Deane, P., Howells, Brian Ó Gallachóir, M., Rogan, F., Bazilian, M., Rogner, H., Incorporating flexibility requirements into long-term energy system models – A case study on high levels of renewable electricity penetration in Ireland, Applied Energy, Volume 135, 2014, Pages 600-615, ISSN 0306-2619, Dotupno na: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.072.

[8] Karin van der Wiel, et al, 2019, Environ. Res. Lett., 14 094010 Dostupno na: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab38d3

[9] Staffell, I., Pfenninger, S., The increasing impact of weather on electricity supply and demand, Energy, Volume 145, 2018, Pages 65-78, ISSN 0360-5442, Dostupno na: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.051.

[10] Ralston Fonseca, F., Craig, M., Jaramillo, P., Bergés, M., Severnini, E., Loew, A., Zhai, H., Cheng, Y., Nijssen, B., Voisin, N., Yearsley, J., Effects of Climate Change on Capacity Expansion Decisions of an Electricity Generation Fleet in the Southeast U.S., Environmental Science & Technology 2021 55 (4), 2522-2531, DOI: 10.1021/acs.est.0c06547

[11] Bevilacqua, P., Perrella, S., Bruno, R., Arcuri, N., An accurate thermal model for the PV electric generation prediction: long-term validation in different climatic conditions, Renewable Energy, Volume 163, 2021, Pages 1092-1112, ISSN 0960-1481, Dostupno na: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.115.

[12] Herc, L., Pfeifer, A., Feijoo, F., Duić, N., Energy system transitions pathways with the new H2RES model: A comparison with existing planning tool, e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, Volume 1, 2021, 100024, ISSN 2772-6711, https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100024.

[13] H2RES model, https://h2res.org/ [16. svibanj 2022.]

[14] Goswami, D.Y., & Kreith, F. (Eds.). (2015). Energy Efficiency and Renewable Energy Handbook (2nd ed.). CRC Press. Dostupno na: https://doi.org/10.1201/b18947

[15] Freris. L., i Infield D., (2008) Renewable energy in power systems, Chichester: J. Wiley and Sons

[16] Šljivac, D., Šimić, Z., (2009.) Obnovljivi izvori energije: Najvažnije vrste, potencijal i tehnologija

[17] Društvo za oblikovanje održivog razvoja, (2011.) ZA OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE! Priručnik za javno zagovaranje obnovljivih izvora energije, Zagreb, Grafokor Dostupno na: https://door.hr/wp-content/uploads/2016/06/OIE-priru%C4%8Dnik.pdf

[18] *iha: Typees of hydropower* Dostupno na: https://www.hydropower.org/iha/discover-types-of-hydropower [16. svibanj 2022.]

[19] *Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY: Types of Hydropower Plants* Dostupno na: https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants [16. svibanj 2022.]

[20] Laughton. M.A.. (Ed.). (1990). Renewable Energy Sources: Watt Committee: report number 22 (1st ed.). CRC Press.

[21] Selin, Noelle Eckley, "tidal power". Encyclopedia Britannica, 4 Apr. 2019, https://www.britannica.com/science/tidal-power [17. svibanj 2022.]

[22] Twidell, J., Weir, T., (2005). Renewable Energy Resources (2nd ed.). Routledge. Dostupno na: https://doi.org/10.4324/9780203478721

[23] IRENA (2019), Demand-side flexibility for power sector transformation, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Dostupno na: http://www.irena.org/publications

[24] Marcus Budt, Daniel Wolf, Roland Span, Jinyue Yan, A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments, Applied Energy, Volume 170, 2016, Pages 250-268, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.108.

[25] International Elecrotechnical Commission, (2011.), Electrical Energy Stoarge, Dostupno na: https://www.iec.ch/basecamp/electrical-energy-storage

[26] Feijoo, F., (2021) Energy system modeling in the INTERENERGY project, webinar prezentacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

[27] Duić, N., Feijoo, F., Pfeifer, A., Herc, L., H2RES V1.0. DOCUMENTATION, October 2021

[28] Lund, H., Zinck Thellufsen, J., Alberg Østergaard, P., Sorknæs, P., Ridjan Skov, I., Vad Mathiesen, B., EnergyPLAN – Advanced analysis of smart energy systems, Smart Energy, Volume 1, 2021, 100007, ISSN 2666-9552, Dostupno na. https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100007.

[29] Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ): Opće značajke klime Hrvatske Dostupno na: https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska&param=k1 [22. svibanj 2022.]

[30] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, STRATEGIJA NISKOUGLJIČNOG RAZVOJA REPUBLIKE HRVATSKE DO 2030. S POGLEDOM NA 2050. GODINU, lipanj 2021. Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_06_63_1205.html

[31] Sparks, AH (2018), "nasapower: A NASA POWER Global Meteorology, Surface Solar Energy and Climatology Data Client for R." The Journal of Open Source Software, 3(30), 1035. doi: 10.21105/joss. [5. lipanj 2022.]

[32] Climate-ADAPT, Dostupno na: https://climate-adapt.eea.europa.eu/ [20. lipanj 2022.]

[33] Güttler, I., et al. 2019, RegCM4 Climate Change Adaptation Simulations: level 2, Državni hidrometeorološki zavod, Dostupno na: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:232:513208. [20. lipanj 2020]

[34] Dispa – SET model, Dostupno na: http://www.dispaset.eu/en/latest/ [5. lipanj 2022.]

[35] 2020 The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis, Dostupno na: https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/croatia [5. lipanj 2022.]

[36] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, ENERGIJA U HRVATSKOJ, GODIŠNJI ENERGETSKI PREGLED, 2020. Dostupno na: https://mingor.gov.hr/UserDocsImages//UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/Ostali%20dokumenti//Energija_u_Hrvatskoj_2020-1.pdf

[37] Sandbag, Dostupno na: https://sandbag.be/index.php/carbon-price-viewer/ [20. lipanj 2022.]

[38] IEA (2021), Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/c8328405-en.

[39] Lund H. Renewable Energy Systems. A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions. Second edition. Academic Press, Elsevier, Oxford, page 362, (2014.) Dostupno na: https://doi.org/10.1016/C2012-0-07273-0

[40] Centar za vozila Hrvatske, Dostupno na: https://www.cvh.hr/naslovnica/ [14. lipanj 2022.]

[41] IEA (2021), Global EV Outlook 2021, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021

[42] ENTSO-e, Dostupno na: https://www.entsoe.eu/ [14. lipanj 2022.]

[43] Renewables.ninja, Dostupno na: https://www.renewables.ninja/ [14. lipanj 2022.]

[44] Eurostat, Dostupno na: https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances [14. lipanj 2022.]

[45] Energy Institute Hrvoje Požar, Comprehensive assessment of the potential for efficiency in heating and cooling in Croatia under Annex VIII to Directive 2012/27/EU, 2021. Dostupno na: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-01/HR%20CA%202020%20en.pdf

[46] Heat Roadmap Europe, EU28 fuel prices for 2015, 2030 and 2050, Dostupno na: https://heatroadmap.eu/

[47] RESFLEX, Dostupno na: https://het.hr/resflex/ [15. lipanj 2022.]

[48] The Danish Energy Agency: Technology data catalogue. Dostupno na: http://www.ens.dk/node/2252. [20. lipanj 2022]

[49] Pavičević, M., Novosel, T., Pukšec, T., Duić, N.. (2017). Hourly optimization model for the sizing of district heating systems considering building refurbishment. Dostupno na: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.105

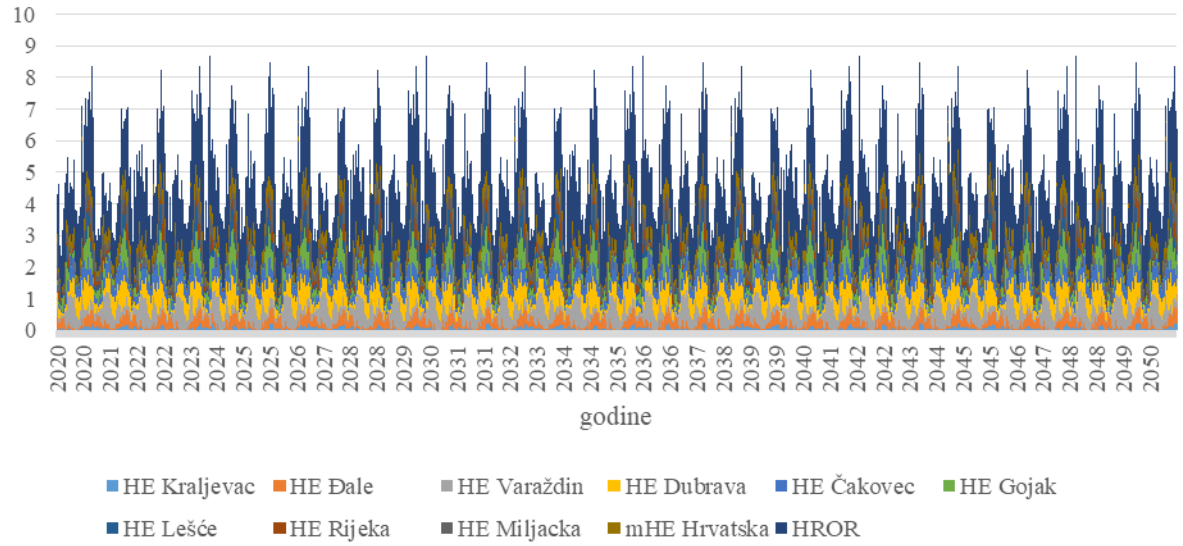
[50] Python, Dostupno na: https://www.python.org/

[51] Gurobi, Dostupno na: https://www.gurobi.com/

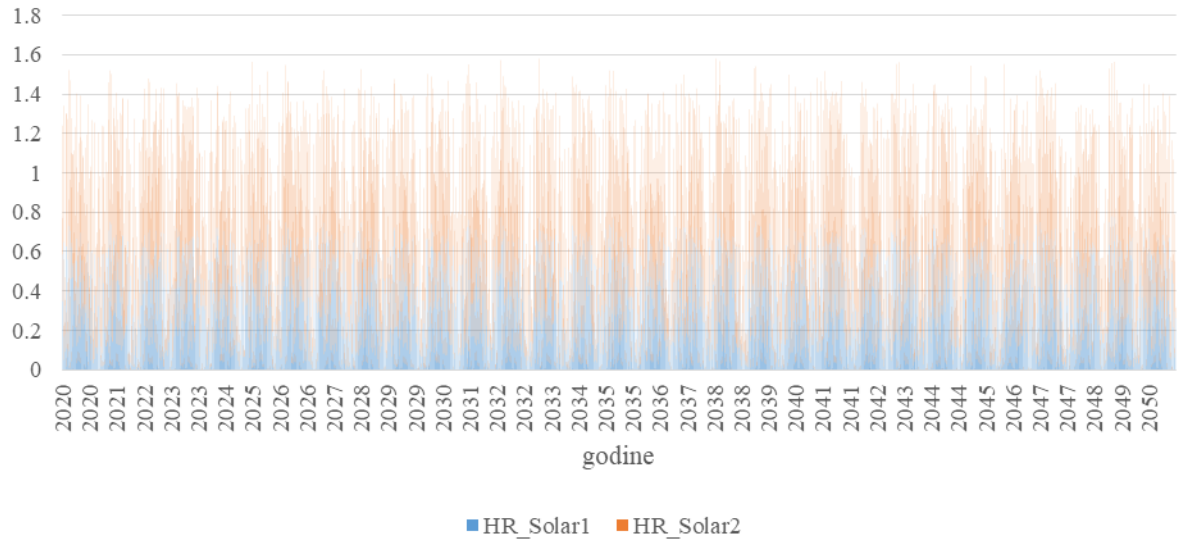
PRILOZI

Dodatak 1. Satni faktori opterećenja protočnih hidroelektrana u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena
Dodatak 2. Satni faktori opterećenja fotonaponskih elektrana u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena
Dodatak 3. Satni faktori opterećenja vjetroelektrana u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena
Dodatak 4. Satni dotoci akumulacijskih hidroelektrana u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena
Dodatak 5. Satni faktori opterećenja protočnih hidroelektrana u scenariju očekivanog razvoja
Dodatak 6. Satni faktori opterećenja fotonaponskih elektrana u scenariju očekivanog razvoja
Dodatak 7. Satni faktori opterećenja vjetroelektrana u scenariju očekivanog razvoja
Dodatak 8. Satni dotoci akumulacijskih hidroelektrana u scenariju očekivanog razvoja
Dodatak 9. Satni faktori opterećenja protočnih hidroelektrana u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta
Dodatak 10. Satni faktori opterećenja fotonaponskih elektrana u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta
Dodatak 11. Satni faktori opterećenja vjetroelektrana u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta
Dodatak 12. Satni dotoci akumulacijskih hidroelektrana scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta
Dodatak 13. Satna proizvodnja električne energije u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena
Dodatak 14. Satna proizvodnja električne energije u scenariju očekivanog razvoja
Dodatak 15. Satna proizvodnja električne energije u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta

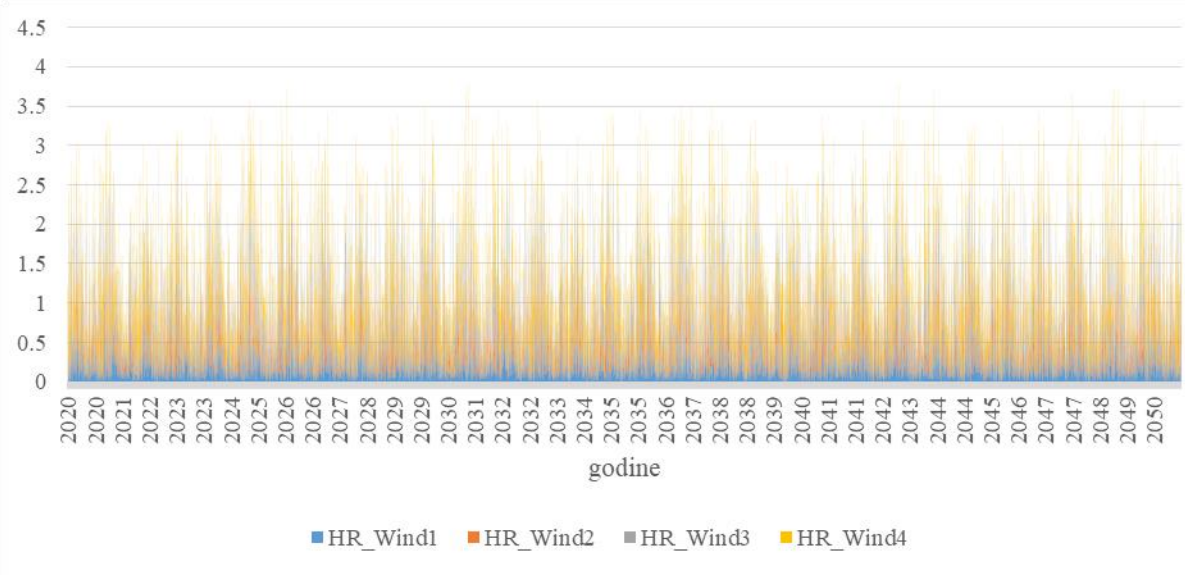
**Napomena: Satne vrijednosti faktora opterećenja i dotoka u akumulacijske hidroelektrane prikazani su u „stacked“ tipu dijagrama radi bolje preglednosti.*



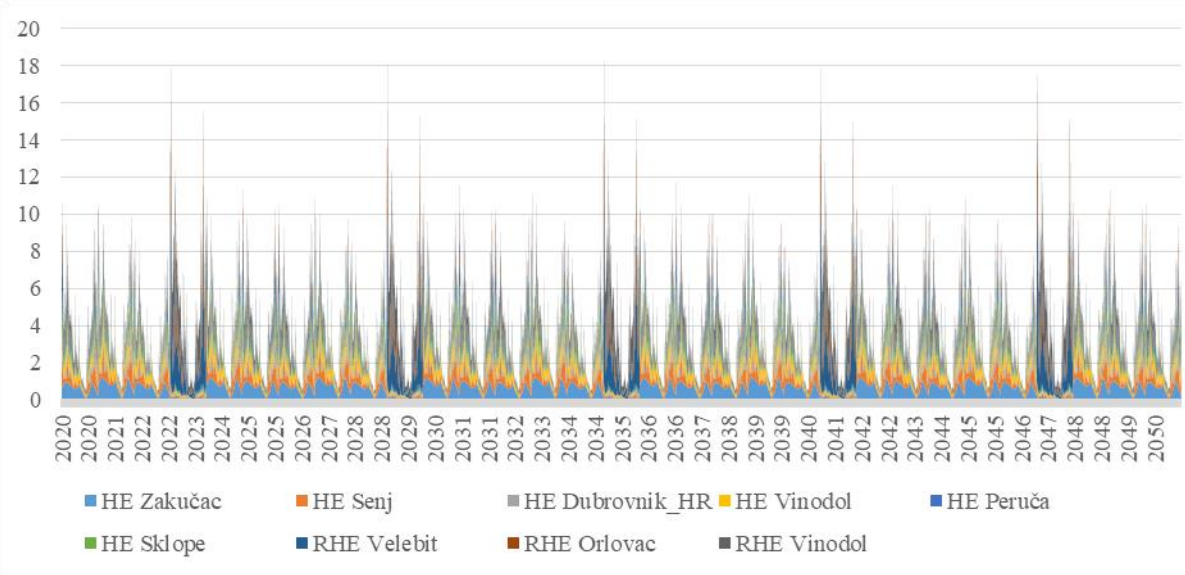
Dodatak 1. Satni faktori opterećenja protočnih hidroelektrana u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena



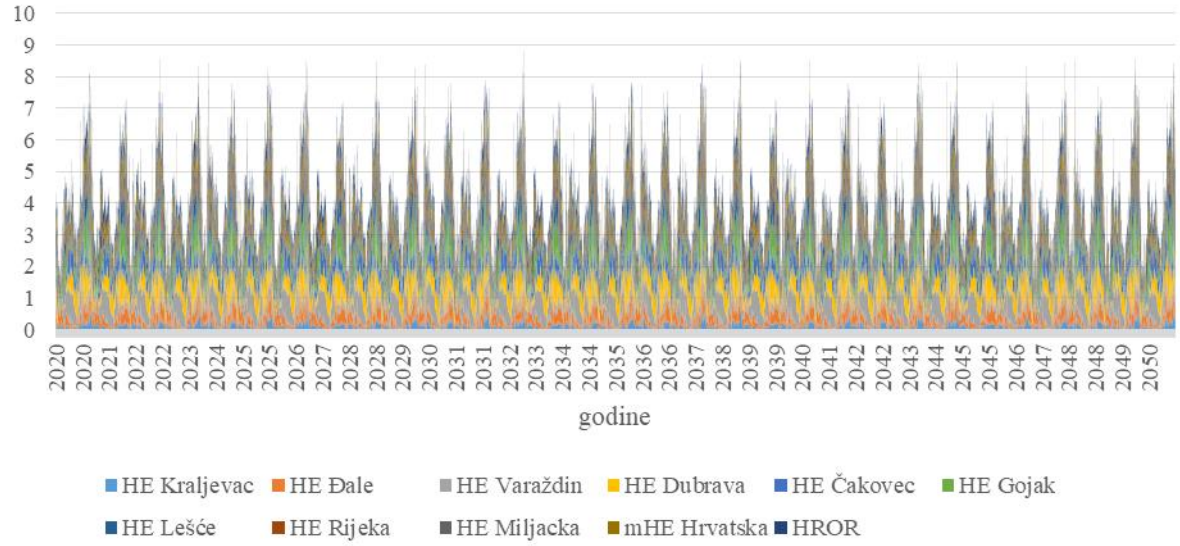
Dodatak 2. Satni faktori opterećenja fotonaponskih elektrana u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena



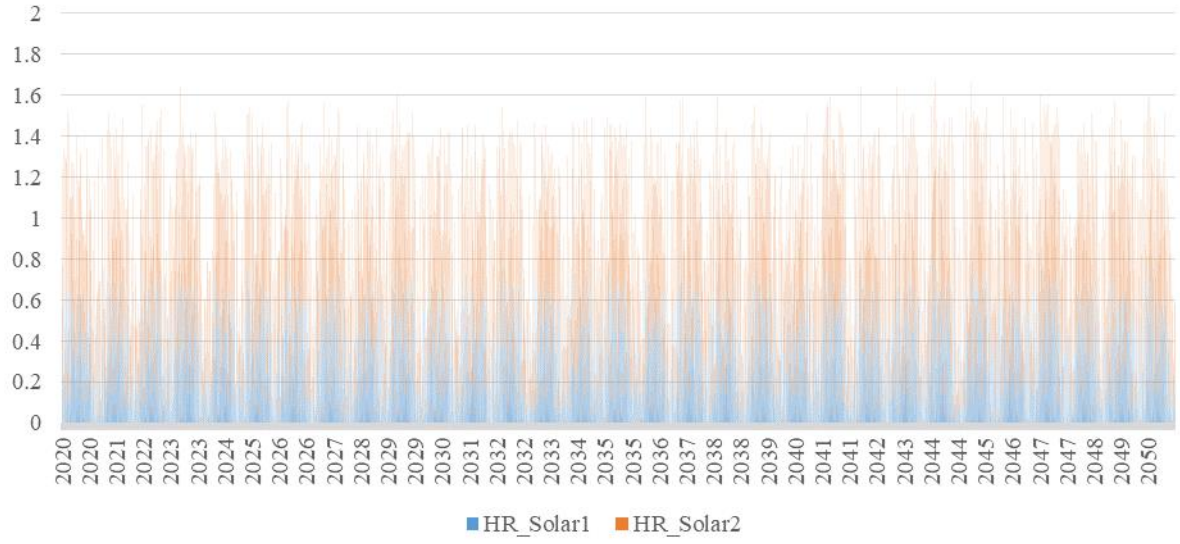
Dodatak 3. Satni faktori opterećenja vjetroelektrana u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena



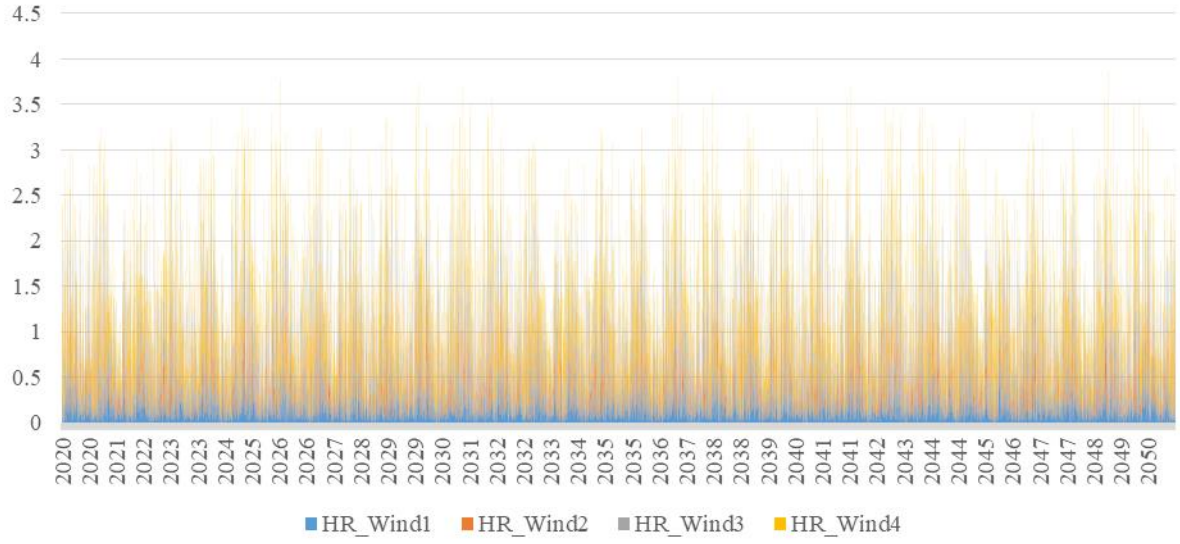
Dodatak 4. Satni dotoci akumulacijskih hidroelektrana u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena



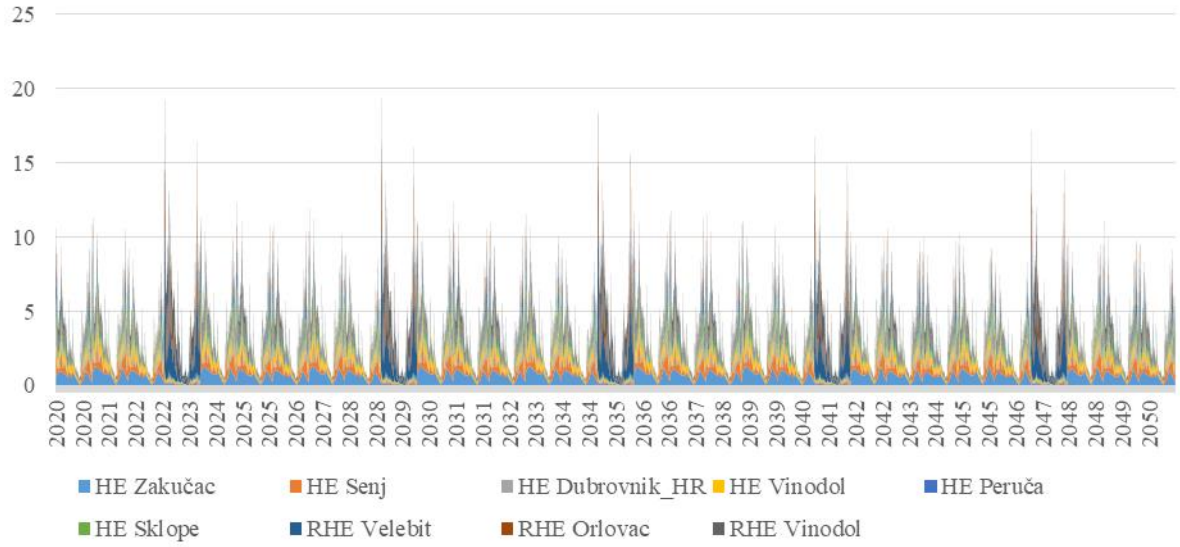
Dodatak 5. Satni faktori opterećenja protočnih hidroelektrana u scenariju očekivanog razvoja



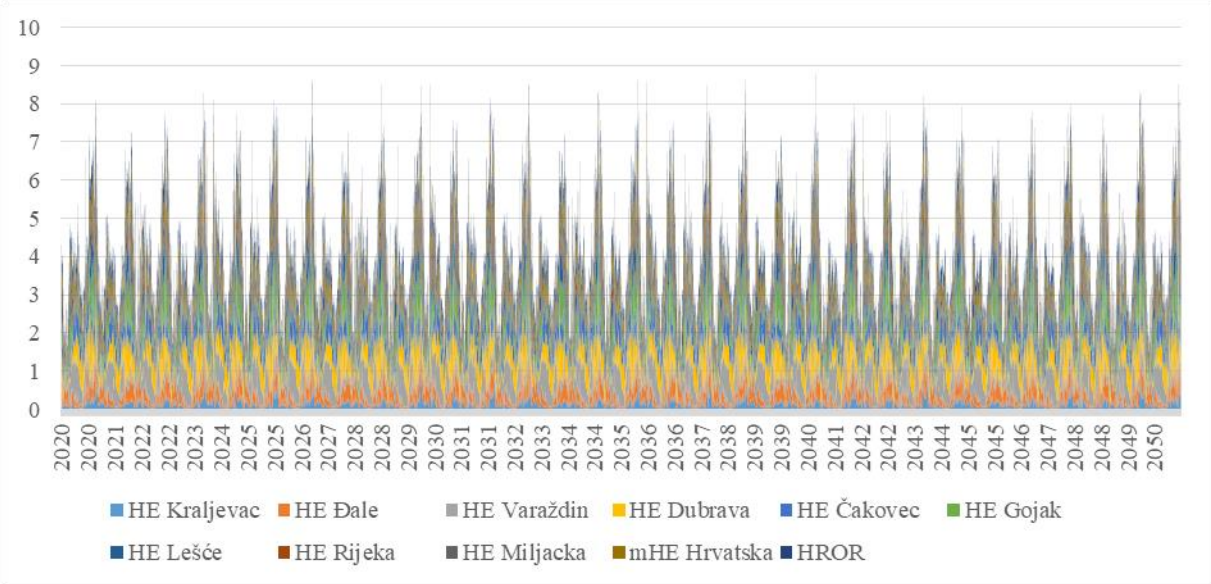
Dodatak 6. Satni faktori opterećenja fotonaponskih elektrana u scenariju očekivanog razvoja



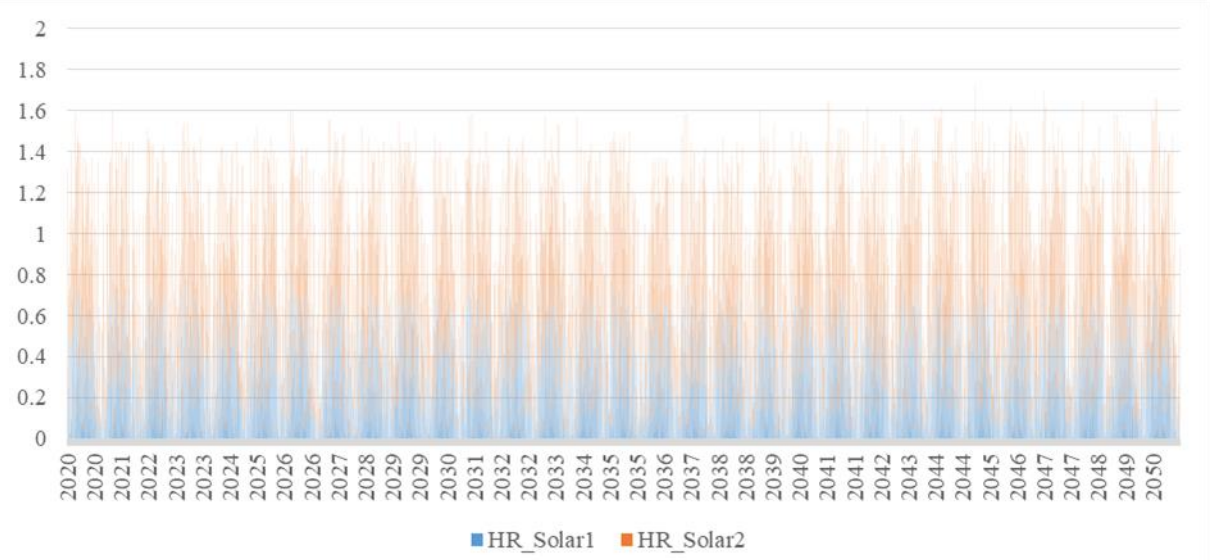
Dodatak 7. Satni faktori opterećenja vjetroelektrana u scenariju očekivanog razvoja



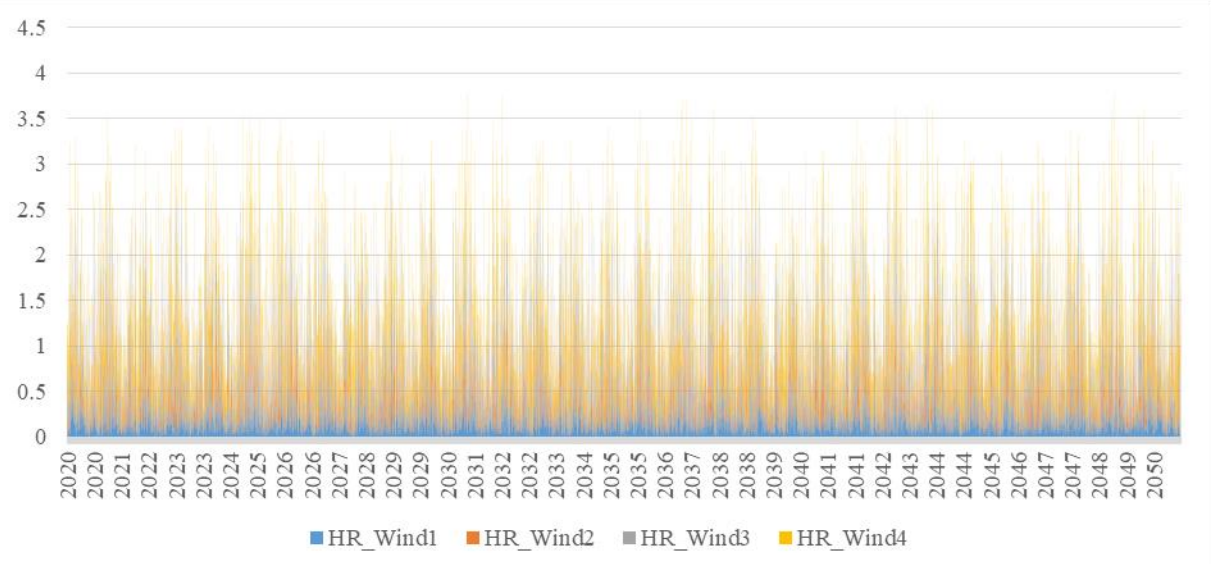
Dodatak 8. Satni dotoci akumulacijskih hidroelektrana u scenariju očekivanog razvoja



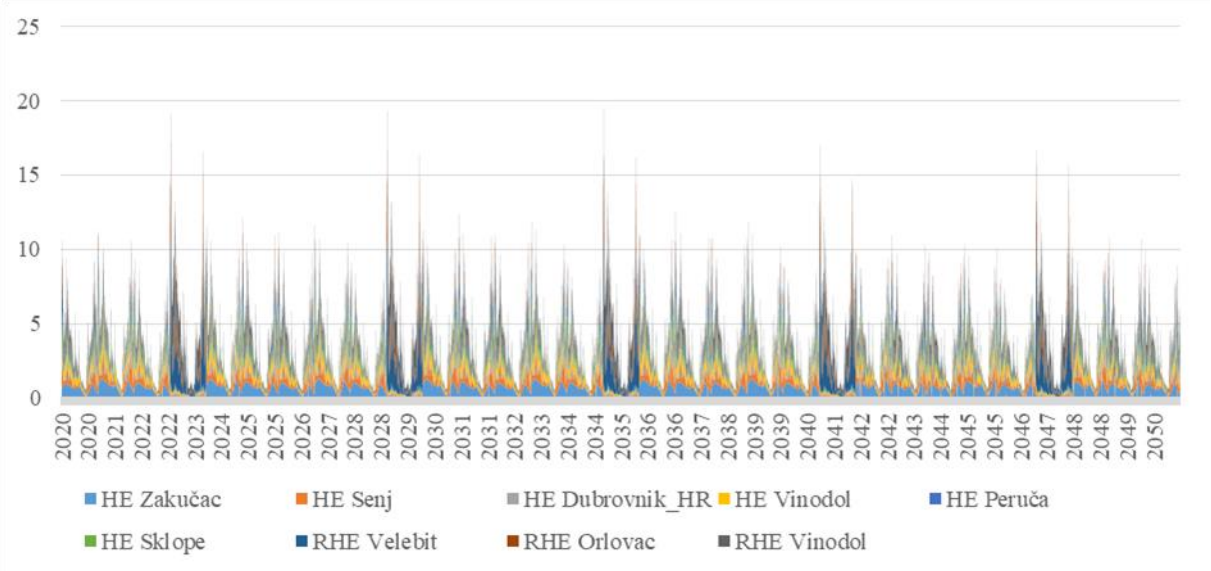
Dodatak 9. Satni faktori opterećenja protočnih hidroelektrana u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta



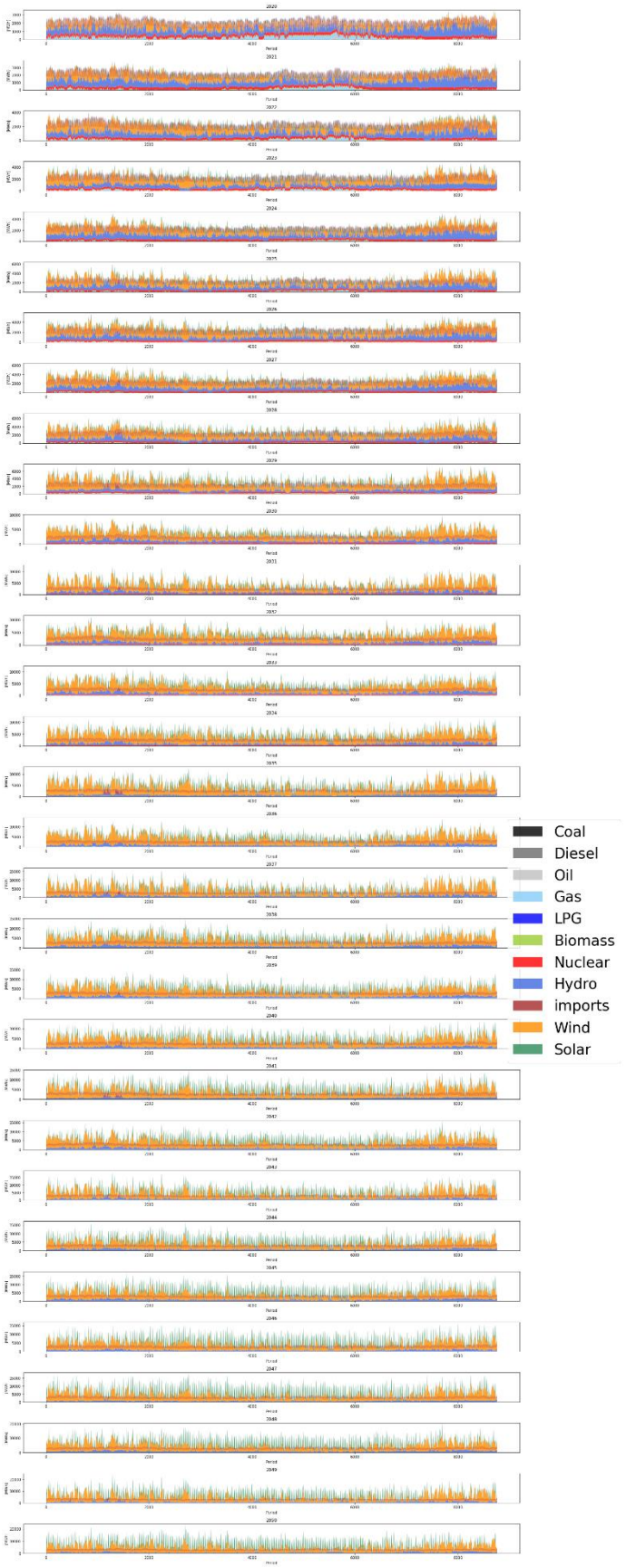
Dodatak 10. Satni faktori opterećenja fotonaponskih elektrana u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta



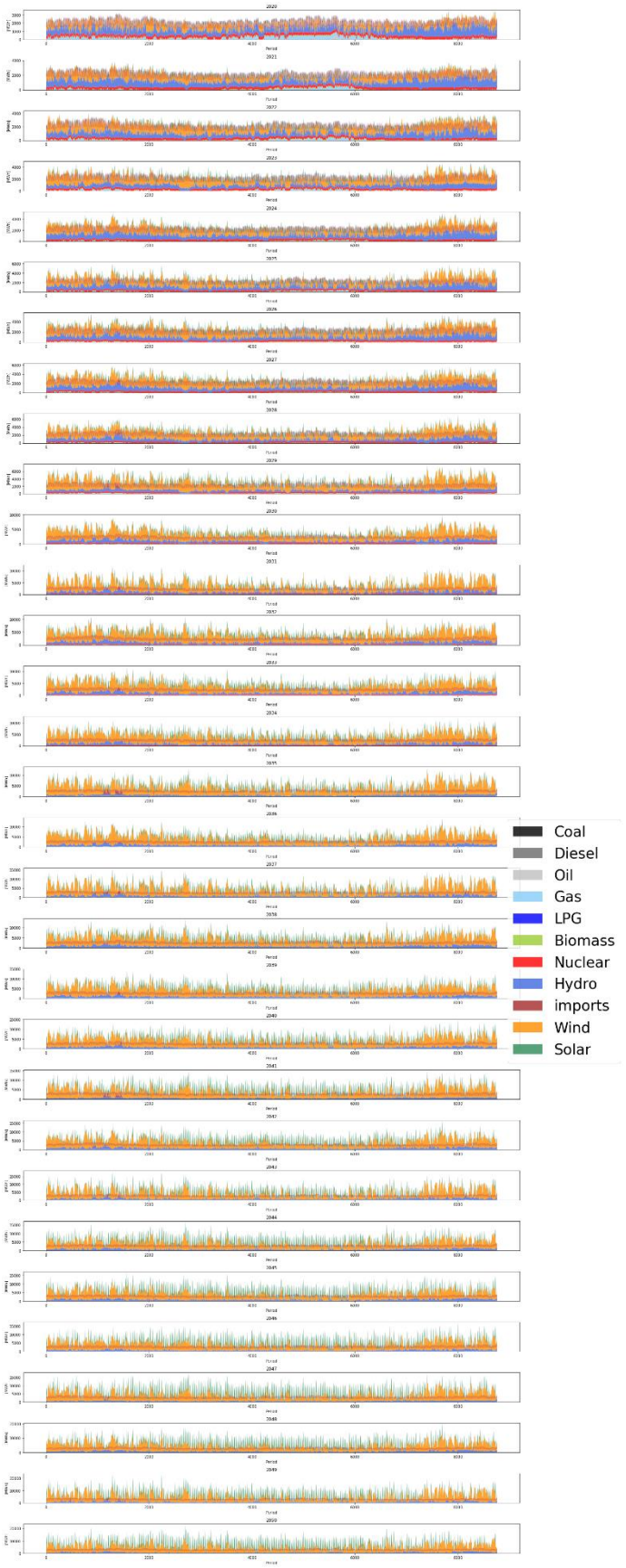
Dodatak 11. Satni faktori opterećenja vjetroelektrana u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta



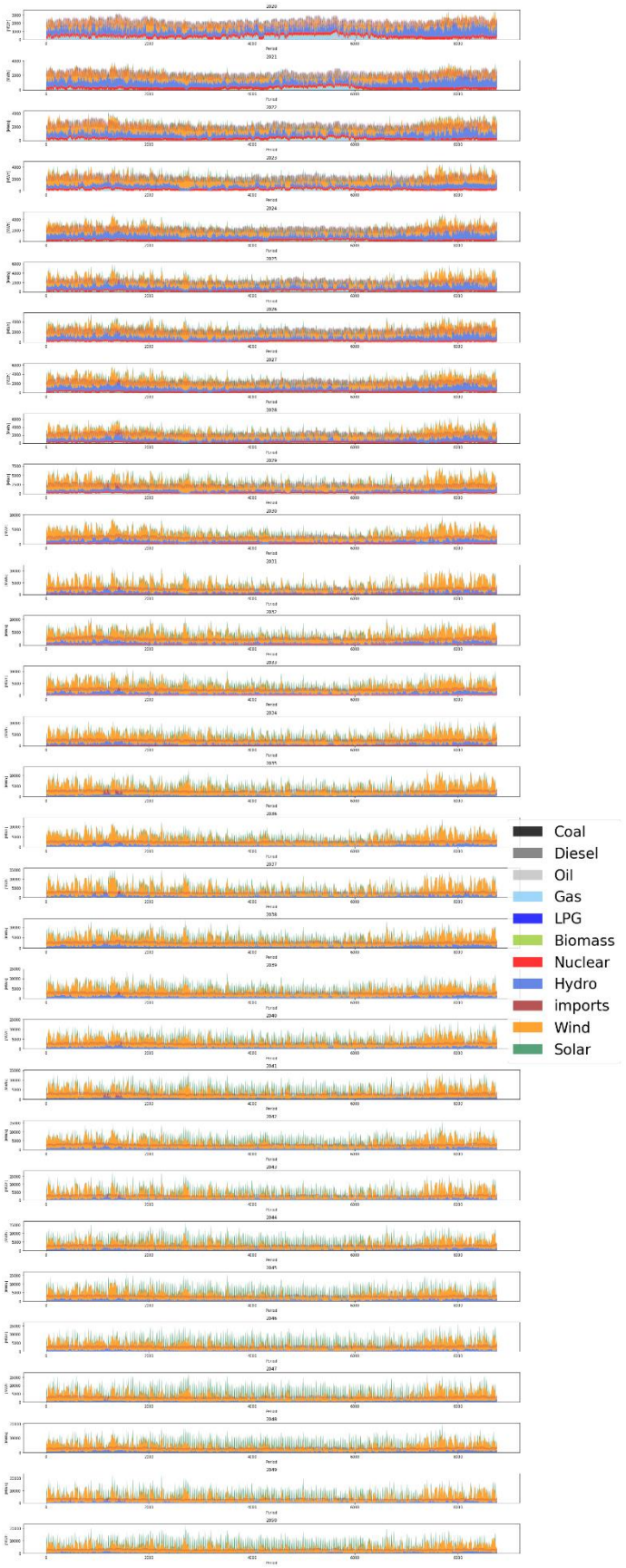
Dodatak 12. Satni dotoci akumulacijskih hidroelektrana scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta



Dodatak 13. Satna proizvodnja električne energije u scenariju bez utjecaja klimatskih promjena



Dodatak 14. Satna proizvodnja električne energije u scenariju očekivanog razvoja



Dodatak 15. Satna proizvodnja električne energije u scenariju s većom učestalosti ekstremnih uvjeta