

Analiza utjecaja hidrologije na rad hidroelektrana u elektroenergetskom sustavu s varijabilnim obnovljivim izvorima energije

Miškić, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:394422>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-03**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Josip Miškić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Analiza utjecaja hidrologije na rad hidroelektrana u
elektroenergetskom sustavu s varijabilnim obnovljivim
izvorima energije**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Josip Miškić

Zagreb, 2021.

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

Josip Miškić

ZAHVALE

Zahvaljujem se profesoru Goranu Krajačiću na prihvaćanju mentorstva te na savjetima i pomoći prilikom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se i asistentu Goranu Stunjeku na savjetima, strpljivost, prenijetom znanju, uloženom vremenu i trudu kojima je uvelike pridonio izradi diplomskog rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Dijani Oskoruš, voditeljici Službe za hidrološke studije, analize i prognoze Državnog hidrometeorološkog zavoda na savjetima i ustupljenim hidrološkim podacima.

Zahvaljujem se projektu „Osiguranje električne energije u slučaju klimatskih ekstrema i prirodnih katastrofa“ financiran iz Europskog fonda za regionalni razvoj, u okviru kojeg je razrađena teme utjecaja hidroloških pojava na budući elektroenergetski sustav te na ustupljenoj licenci za softver GAMS.

Zahvaljujem se svim profesorima i asistentima tijekom studiranja na prenijetom znanju i danim savjetima.

Naposljetku se zahvaljujem dragom Bogu na svemu što mi je podario, osobito na svojoj obitelji. Zahvaljujem se ocu Nikoli i majci Anđi bez čije podrške, ljubavi, razumijevanja i strpljivosti ništa od ovog ne bi bilo moguće. Zahvaljujem se i bratu Stanku i sestri Mihaeli koji su mi bili podrška tijekom studiranja.

Josip Miškić



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 brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Josip Miškić** JMBAG: 0035206836
Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza utjecaja hidrologije na rad hidroelektrana u elektroenergetskom sustavu s varijabilnim obnovljivim izvorima energije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Hydrology impact analysis on the hydropower generation in the power system based on the variable renewable energy sources**

Opis zadatka:

Sve veću pozornost akademske zajednice, ali i šire javnosti, privlači međuovisnost tri glavna svjetska resursa, vode, energije i hrane, istovremeno uzimajući u obzir utjecaj na okoliš. Tako se pod zajedničkim nazivom definira pojam spone vode, energije, hrane i okoliša (eng. Water-Energy-Food-Ecosystem nexus - WEFE). Klimatske promjene značajno utječu na nesigurnost u pogledu dostupnosti budućih vodnih resursa, što utječe na dugoročnu sigurnost dobave vode, energije i hrane. Europska unija i međunarodna zajednica shvaćaju da su komponente vode, energije, hrane i okoliša međusobno povezane i da im je potrebno zajedničko planiranje, kako bi se odgovorilo globalnim izazovima sigurnosti dobave vode, energije i hrane, a osiguravajući istovremeno očuvanje ekosustava. Sveobuhvatno i dubinsko razumijevanje vodno-energetske veze važno je za postizanje održivog upravljanja resursima. Postojeći sustavi hidroelektrana predstavljaju znatni potencijal za nadogradnju i optimizaciju rada, s ciljem optimalnog upravljanja dostupnim vodnim resursima. Stoga je u okviru ovog rada potrebno prikazati utjecaj rada hidroelektrana u budućem elektroenergetskom sustavu, koji se bazira na većem udjelu varijabilnih obnovljivih izvora energije, s utjecajem prognoziranih hidroloških uvjeta koji su rezultat klimatskih promjena.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Provesti analizu postojećeg elektroenergetskog sustava hidroelektrana u Hrvatskoj, analizirati novo planirana postrojenja te odabrati sustav hidroelektrana koji će se analizirati u točkama 2., 3. i 4.,
2. Napraviti pregled dostupnih mjernih mjesta vodotoka i vodostaja ključnih rijeka za odabrani sustav iz točke 1.,
3. Odabranim statističkim metodama usporediti dostupna mjerenja s modeliranim vrijednostima dobivenim iz LISFLOOD modela,
4. Koristeći Strategiju energetske razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu kao bazu, potrebno je analizirati minimalno 3 scenarija utjecaja hidrologije na rad hidroelektrana, a time i na rad cjelokupnog elektroenergetskog sustava, s pogledom na utjecaj sve većeg udjela varijabilnih obnovljivih izvora u elektroenergetskom sustavu Hrvatske.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

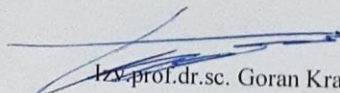
6. svibnja 2021.

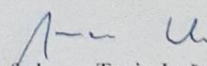
8. srpnja 2021.

12. – 16. srpnja 2021.

Zadatak zdao:

Predsjednik Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
1.1. Energija u Svijetu.....	3
1.1.1. Potražnja energije.....	4
1.1.2. Proizvodnja električne energije.....	7
1.2. Energija u Republici Hrvatskoj	9
1.2.1. Potrošnja energije.....	9
1.2.2. Proizvodnja električne energije.....	11
2. HIDROLOGIJA REPUBLIKE HRVATSKE	13
2.1. Crnomorski sliv.....	14
2.1.1. Podsliv rijeke Drave.....	15
2.1.2. Podsliv rijeke Kupe.....	16
2.2. Jadranski sliv.....	17
2.2.1. Primorsko – istarski sliv.....	18
2.2.1.1. Podsliv rijeke Rječine	18
2.2.1.2. Podsliv rijeke Lokvarke	18
2.2.1.3. Podsliv rijeke Ličanke.....	19
2.2.1.4. Podsliv rijeke Like	20
2.2.1.5. Podsliv rijeke Gacke	20
2.2.2. Dalmatinski sliv	21
2.2.2.1. Sliv rijeka Neretva – Trebišnjica	21
2.2.2.2. Podsliv rijeke Cetine	22

2.2.2.3.	Podsliv rijeke Krke	22
2.2.2.4.	Podsliv rijeke Zrmanje	23
3.	ELEKTROENERGETSKI SUSTAV REPUBLIKE HRVATSKE	24
3.1.	Energetski sustav Hrvatske	24
3.2.	Stanje izgrađenosti hidroelektrana u Hrvatskoj	26
3.3.	Prijenosna mreža električne energije Hrvatske	29
3.4.	Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu	32
3.4.1.	Ukupna potrošnja energije	34
3.4.2.	Bruto neposredna potrošnja energije.....	35
3.4.3.	Proizvodnja električne energije.....	37
4.	OPIS MODELA	39
4.1.	LISFLOOD	39
4.2.	Podatci Državnog hidrometeorološkog zavoda.....	42
4.2.1.	Dostupni podaci DHMZ – a.....	42
4.2.2.	Usporedba dostupnih podataka o protocima DHMZ – a i LISFLOOD – a	44
4.3.	Dispa – SET Medium – Term Hydrothermal Coordination (Dispa – SET MTHC) ..	45
5.	ULAZNI PODATCI ZA Dispa – SET MTHC model.....	50
5.1.	Podaci o elektranama	50
5.2.	Podaci o profilu potražnje električne energije	53
5.3.	Hidrološki podaci	54
5.4.	Podaci o proizvodnji iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana.....	55
5.5.	Podaci o elektroenergetskom sustavu	56
5.6.	Topologija	57
5.7.	Potražnja za vodom	57
6.	ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA.....	58
6.1.	Analiza proizvodnje hidroelektrana u referentnom stanju	59
6.2.	Analiza rezultata scenarija 1	64
6.2.1.	Rezultati scenarija 1 za 2030. godinu	65
6.2.2.	Rezultati scenarija 1 za 2050. godinu	69
6.3.	Analiza rezultata scenarija 2	73

6.3.1. Rezultati scenarija 2 za 2030. godinu	74
6.3.2. Rezultati scenarija 2 za 2050. godinu	78
6.4. Sažetak dobivenih rezultata Dispa – SET MTHC modela.....	82
7. ZAKLJUČAK I PRIJEDLOG BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA	85
LITERATURA.....	87
PRILOZI.....	93

POPIS SLIKA

Slika 1	Potrošnja primarne energije - Svijet i Europa [12].....	4
Slika 2	Potrošnja primarne energije prema korištenom energentu - Svijet [12]	5
Slika 3	Potrošnja primarne energije proizvedene iz hidroelektrana – Svijet i Europa [12]	6
Slika 4	Proizvedena električna energija - Svijet i Europa [15].....	7
Slika 5	Proizvedena električna energija prema korištenom energentu – Svijet [15].....	8
Slika 6	Proizvedena električna energija prema korištenom energentu – Europa [15].....	8
Slika 7	Potrošnja primarne energije – Hrvatska [12]	10
Slika 8	Potrošnja primarne energije prema korištenom energentu – Hrvatska [12].....	11
Slika 9	Proizvedena električna energija prema korištenom energentu – Hrvatska [15]....	12
Slika 10	Podjela Hrvatske na slivove [18].....	13
Slika 11	Crnomorski sliv u Hrvatskoj [20].....	14
Slika 12	Jadranski sliv [18]	17
Slika 13	Stanje izgrađenosti hidroelektrana u Hrvatskoj [18].....	26
Slika 14	Elektroenergetska mreža Republike Hrvatske [58].....	29
Slika 15	Ukupna potrošnja energije prema S2 [7].....	34
Slika 16	Ukupna potrošnja energije prema S1 [7].....	34
Slika 17	Bruto neposredna potrošnja prema scenariju S1 [7]	35
Slika 18	Bruto neposredna potrošnja prema scenariju S2 [7]	36
Slika 19	Proizvodnja električne energije prema scenariju S1 [7].....	37
Slika 20	Proizvodnja električne energije prema scenariju S2 [7].....	37
Slika 21	Pregled LISFLOOD modela [64]	41
Slika 22	ENTSO - E dijagram potražnje za električnom energijom u 2019. godini – Hrvatska [56]	53
Slika 23	Usporedba protoka referentne, sušne i vlažne godine [64]	54
Slika 24	Faktor opterećenja sunčeve energije tijekom prosječne referentne godine [70] ...	55
Slika 25	Faktor opterećenja energije vjetra tijekom prosječne referentne godine [70].....	56
Slika 26	Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – referentna godina	60
Slika 27	Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model – referentna godina...	61
Slika 28	Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – referentna godina	61

Slika 29	Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom – referentna godina [56]	63
Slika 30	Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – 2030 – S1	65
Slika 31	Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model – 2030 – S1	66
Slika 32	Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – 2030 - S1	66
Slika 33	Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom – Dispa – SET – MTHC model – 2030 – S1 [56]	68
Slika 34	Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S1	69
Slika 35	Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S1	70
Slika 36	Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S1.....	70
Slika 37	Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom – Dispa – SET – MTHC model – 2050 – S1 [56]	72
Slika 38	Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – 2030 – S2	74
Slika 39	Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model - 2030 - S2.....	75
Slika 40	Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – 2030 – S2.....	75
Slika 41	Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom – Dispa – SET – MTHC model – 2030 – S2 [56]	77
Slika 42	Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S2	78
Slika 43	Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model - 2050 - S2.....	79
Slika 44	Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S2.....	79
Slika 45	Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom – Dispa – SET – MTHC model – 2050 – S2 [56]	81
Slika 46	Profil faktora opterećenja energije vjetra i hidroloških podataka - prosječna godina [64], [70].....	83
Slika 47	Profil faktora opterećenja energije sunca i hidroloških ulaznih podataka - prosječna godina [64], [70].....	84

POPIS TABLICA

Tablica 1	Pregled termoelektrana u Hrvatskoj [17]	24
Tablica 2	Popis hidroelektrana u Hrvatskoj [25].....	27
Tablica 3	Pregled planiranog proširenja HES Senj [61]–[63].....	28
Tablica 4	Stanje prijenosne mreže EES - a (5. veljače 2020. godine) [58].....	30
Tablica 5	Stanje distribucijske mreže EES -a (5. veljače 2020. godine) [58].....	30
Tablica 6	Pregled i usporedba glavnih odrednica razmatranih scenarija [7]	33
Tablica 7	Pregled slivnih područja s mjernim postajama [18], [25]	42
Tablica 8	Usporedba podataka DHMZ - a i LISFLOOD - a.....	44
Tablica 9	Pregled početnih podataka [69]	46
Tablica 10	Pregled varijabli [69].....	46
Tablica 11	Pregled parametara (konstanti) [69]	47
Tablica 12	Ulazni podaci elektrana [17]	51
Tablica 13	Ulazni podaci hidroelektrana [25].....	52
Tablica 14	Prekogranični neto kapaciteti za razmjenu električne energije za 2014. godinu [72]	56
Tablica 15	Usporedba Dispa - SET MTHC podataka sa stvarnim statističkim podacima referentnog stanja [73]–[75].....	59
Tablica 16	Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana - referentna godina	62
Tablica 17	Promjena kapaciteta za proizvodnju električne energije – S1 [7], [17]	64
Tablica 18	Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana – 2030 – S1	67
Tablica 19	Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana – 2050 – S1	71
Tablica 20	Promjena kapaciteta za proizvodnju električne energije – S2 [7], [17]	73
Tablica 21	Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana – 2030 – S2	76
Tablica 22	Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana – 2050 – S2	80
Tablica 23	Pregled dobivenih rezultata Dispa - SET MTHC modela	82

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
p	-	Vremenski period
ut	-	Termoelektrane
ur	-	Elektrane obnovljivih izvora energije
uh	-	Akumulacije hidroelektrane
up	-	Reverzibilne hidroelektrane
l	-	Prijenosna mreža sa susjednim državama
n	-	Države
t	-	Tehnologije prema korištenom energentu
G (p, u)	GWh	Energija proizvedena u periodu p iz elektrane u
PUMP (p, u)	GWh	Energija vode pohranjene u periodu p u akumulaciji elektrane u
RES (p, u)	Mm ³	Voda pohranjena u periodu p u akumulaciji elektrane u
DIS (p, u)	m ³ /s	Potrošnja vode u periodu p u elektrane u
CH	m ³ /s	Protok punjenja akumulacije u periodu p u elektrani u
SPILL (p, u)	m ³ /s	Gubitak vode u periodu p elektrane u
UPSTREAM (p, u)	m ³ /s	Ulazni protok iz uzvodne hidroelektrane u periodu p za elektranu u
FLOW (p, l)	GWh	Prenošena energija u periodu p mrežom l
CURT (p, n)	GWh	Iskorištena energija vode u periodu p u državi n
LOSTLOAD (p, n)	GWh	Nezadovoljena potražnja u periodu p u državi n
dt	h	Duljina perioda
Gravitty	m/s ²	Gravitacijska konstanta
Density	kg/m ³	Gustoća vode
Factor 1	Mm ³ /(m ³ /s)	Pretvorbeni faktor iz m ³ /s to Mm ³
Factor 2	GWh/((m ³ /s)s)	Pretvorbeni faktor iz m ³ /s u GWh
Technology (u,T)	/	Korištena tehnologija

Demand (p, n)	GWh	Potražnja za električnom energijom za državu u periodu p
Duration (n, t)	Day	Minimalan broj dana u kojem tehnologija bi trebala proizvoditi da bi bila u statistici
Location (u, n)	/	Lokacija postrojenja
Pmin (u)	GW	Minimalna snaga elektrane pri kojoj može raditi
Pmax (u)	GW	Instalirani kapacitet elektrane
VarCost (u)	k€/GWh	Varijabilni troškovi proizvodnje elektrane
Stmin (u)	Mm ³	Minimalni volumen vode u spremniku akumulacije
Stmax (u)	Mm ³	Maksimalni volumen vode u spremniku akumulacije
Stinit (u)	Mm ³	Volumen vode spremnika akumulacije u početnom trenutku
Eta_pump (u)	%	Iskoristivost pumpe
Eta_turb (u)	%	Iskoristivost turbine
Delay (u, uu)	Day	Vrijeme uključenja elektrane u proizvodnju električne energije
NominalHead (u)	M	Nominalna visina dobave hidroelektrane
Resources (u)	m ³ /s	Ulazni protok vode
Evaporation (u)	m ³ /s	Gubitak zbog isparavanja iz akumulacije
Profiles (u)	/	Faktor kapaciteta solarnih i vjetroelektrana
Topology (u)	/	Kaskadni sustavi hidroelektrana
Spillage_max (u)	m ³ /s	Dozvoljeno izlivanje iz akumulacije
Incidence_matrix (u)	/	Matrica povezanosti prijenosnog sustava s državom u okruženju
LineCapacity (u)	GW	Kapacitet prijenosne mreže
DemandW (u)	m ³ /s	Potražnja za vodom izvan energetskog sektora
Eco_flow	m ³ /s	Protok biološkog minimuma
Availability (u)	%	Raspoloživost postrojenja
HR	-	Hrvatska
BIO	-	Elektrane na biomasu

GAS	-	Elektrane na prirodni plin
GEO	-	Geotermalne elektrane
HRD	-	Elektrane na ugljen
NUC	-	Nuklearne elektrane
OIL	-	Elektrane na naftu
WAT	-	Hidroelektrane
WIN	-	Vjetroelektrane
WST	-	Elektrane na otpad
HDAM	-	Pribranske hidroelektrane
HROR	-	Protočne hidroelektrane
HPHS	-	Reverzibilne hidroelektrane
HE	-	Hidroelektrane
S1	-	Scenarij 1
S2	-	Scenarij 2
DHMZ	-	Državni hidrometeorološki zavod
MP	-	Mjerna postaja
EES	-	Elektroenergetski sustav
OIE	-	Obnovljivi izvori energije

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu promatran je utjecaj hidroloških uvjeta na rad hidroelektrana u elektroenergetskom sustavu s varijabilnim obnovljivim izvorima energije u Hrvatskoj. Za izradu rada korišteni su hidrološki podaci LISFLOOD modela koji su ulazni podaci za Dispa – SET Medium – Term Hydrothermal Coordination (Dispa – SET MTHC) model. Promatrani hidrološki uvjeti su za hidrološki prosječnu godinu, vlažnu te sušnu godinu. Scenariji su kreirani prema *Strategiji energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu* te se razlikuju dva scenarija: scenarij 1 i scenarij 2. Scenarij 1 predstavlja ubranu energetske tranziciju, dok scenarij 2 predstavlja scenarij umjerene energetske tranzicije. Scenariji su promatrani u 2030. godini i 2050. godini. Podaci o elektroenergetskom sustavu prikupljeni su iz dostupnih baza podataka, izvješća i dokumentacije. Referentni podaci o EES – u korišteni su podaci 2019. godine, dok su referentni podaci hidrometeoroloških uvjeta mijenjani ovisno o tipu godine koja je simulirana. Za hidrološki prosječnu godinu korišteni su podaci 2009. godine, vlažnu godinu podaci 2014. godine te sušnu godinu podaci 2011. godine.

U prvom poglavlju diplomskog rada predstavljeno je stanje energije u Svijetu, Europi i Hrvatskoj s naglaskom na elektroenergetski sektor i proizvodnju električne energije iz hidroelektrana te varijabilnih obnovljivih izvora energije, tj. energije vjetra i sunca. Zatim u drugom poglavlju predstavljena je hidrologija Hrvatske tj. hidrologija slivnih područja na kojima se nalaze hidroelektrane u Hrvatskoj. U trećem poglavlju prikazano je stanje hrvatskog elektroenergetskog sustava s obzirom na proizvodne kapacitete, kapacitete prijenosnog sustava te buduću strategiju razvoja hrvatskog elektroenergetskog sustava. U idućem četvrtom poglavlju prikazana je metodologija izrade diplomskog rada, opisan je LISFLOOD hidrološki model, postupak usporedbe, odabira i procjene hidroloških podataka LISFLOOD – a i Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) te opis Dispa – SET MTHC modela. U petom poglavlju prikazani su ulazni podaci za Dispa – SET MTHC model te su u šestom poglavlju prikazani rezultati modela. Rezultati modela su analizirani, uspoređeni sa statističkim podacima te popraćeni komentarima.

Naposljetku u sedmom poglavlju dan je zaključak te prijedlog budućih istraživanja.

KLJUČNE RIJEČI: hidrologija, električna energija, hidroelektrane, elektroenergetski sustav, varijabilni obnovljivi izvori energije, LISFLOOD, Dispa – SET MTHC

SUMMARY

In this thesis hydrological impact on the hydropower generation in the power system based on the variable renewable energy system in Croatia is analyzed. The hydrological data of the LISFLOOD model, which are the input data for the Dispa – SET Medium Term Hydrothermal Coordination (Dispa – SET MTHC) model, were used to create this thesis. The scenarios were created according to *the Energy Development Strategy of the Republic Croatia until 2030 with a view to 2050* and two scenarios are distinguished: scenario 1 and scenario 2. Scenario 1 represents an accelerated energy transition, while scenario 2 represents a scenario of the moderate energy transition. Scenarios were observed in 2030 and 2050. Power system data were collected from databases, reports, and documentation. Reference data on the power system were data from 2019. While the reference data of hydrometeorological conditions were changed depending on the type of the year that was simulated. For the hydrologically average year, data from 2009, wet year data from 2014, and dry year data from 2011 were used.

The first chapter of the thesis presents the state of energy in the world, Europe, and Croatia with emphasis on the electricity sector and the production of electricity from hydropower plants and variable renewable energy sources, i.e. wind and solar energy. Then, in the second chapter, the hydrology of catchments areas where hydro electrical power plants in Croatia are located. The third chapter presents the state of the Croatian electricity system with regards to generation capacities, transmission system capacities, and the future strategy of the development of the Croatian electricity system. The next fourth chapter presents the methodology of the thesis describes the LISFLOOD hydrological model, the procedure of comparison, selection, and evaluation of hydrological data of LISFLOOD and State Hydrometeorological Institute (Croatian: Državni hidrometeorološki zavod, DHMZ) and a description of the Dispa – SET MTHC model. The fifth chapter presents the input data for the Dispa – SET MTHC model, and the sixth chapter presents the model results. The results were analyzed, compared with statistics, and accompanied by comments.

Finally, in the seventh chapter, a conclusion is given and a proposal for future research is given.

KEYWORDS: hydrology, electric energy, hydropower generation, power system, variable renewable energy sources , LISFLOOD, Dispa – MTHC

1. UVOD

Još od najranijih vremena, voda je prepoznata kao jedan od najvažnijih resursa na Zemlji te su upravo područja bogata vodom oduvijek privlačila narode i bila poželjna za naseljavanje. Voda je oduvijek predstavljala izvor hrane i života te je njeno očuvanje bilo prioritet mnogim narodima i kulturama. Paralelno s civilizacijskim napretkom tekao je i tehnološki napredak čovječanstva. Iako u počecima primitivan i jednostavan, ljudi su pronalazili nove načine kojima su željeli sebi olakšati svakodnevnice, stoga su otkrivali i posezali za novim načinima iskorištavanja vodenog potencijala. Razvijali su jednostavne sustave navodnjavanja, koristili vodenu energiju u mlinicama te su time dali vodi ulogu koja je obilježila mnoge etape ljudskog razvoja.

Tako je krajem 19. stoljeća i početkom 20. stoljeća prepoznat je elektroenergetski potencijal vode, tj. potencijal proizvodnje električne energije iz vodenih resursa. Korištenjem vode u energetske svrhe dolazi do naglog razvoja tehnologija povezanih s energetikom, time se najviše ističu područja turbostrojeva i elektroenergetike. U to vrijeme bilježi se, ne samo nagli razvoj energetskog iskorištavanja vode, nego i razvoj naprednih sustava navodnjavanja, uređenja vodnih režima, opskrbe vodom, proizvodnje poljoprivrednih dobara pomoću vode.

Kao i danas, i tada je bio velik utjecaj ljudi na okoliš te su u to vrijeme narušeni mnogi ekosustavi te bioraznolikost mnogih područja. Danas, nakon gotovo 100 godina, u fokusu su upravo promjene okoliša i klime te se postavlja pitanje položaja korištenja vode kao važnog resursa kako bi se te promjene ublažile ili spriječile. Svjedoci smo da je voda već tim promjenama zahvaćena te je jedino na nama koliko ćemo odgovorno pristupiti ovom problemu. Stoga je važno prepoznati ozbiljnost i motivaciju *Strategije prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2050. godinu* [1] te u skladu s njom početi pravovremeno djelovati. Tom strategijom su propisane i mnoge promjene koje se mogu očekivati na području hidrologije u odnosu na referentno razdoblje od 1971. do 2000. godine, kao što su: smanjenje količine oborina, povećana učestalost ekstremnih oborinskih uvjeta, smanjenje snježnog pokrova i do 50 %, povećanje temperature za 1 do 1,4 °C, povećana učestalost sušnih razdoblja, povećan tok ulazne sunčane energije, itd. . Uzimajući sve navedeno u obzir lako je zaključiti kako su svim tim promjenama obuhvaćeni i vodni resursi te se već na mnogim područjima svijeta štete od takvih promjena mogu i kvantificirati. Taj utjecaj može se naći i u dijelu energetike koji se oslanja na vodne resurse. Tako se danas može zbrajati šteta od

smanjenje proizvodnje iz hidroelektrana zbog nedostatka dovoljne količine vode ili smanjenje proizvodnje iz nuklearnih elektrana zbog nedostatka dovoljne količine rashladne vode. [2]

Svi ti događaji, dovode do spoznaje o važnosti vode u elektroenergetskim sustavima te uvođenja novog termina koji obuhvaća područje vodnih i energetske sustava uključujući promatranje utjecaja na sustave za proizvodnju hrane i utjecaja na cjelokupni ekosustav (eng. Water Energy Food Ecosystem Nexus – WEFE) [3]. On označava cijelo novo područje odnosa vode i energetske sektora, koje je potrebno istražiti kako bi se postiglo bolje iskorištavanje vodnih resursa. Dobro je poznato kako hidroelektrane omogućuju elektroenergetskim sustavima fleksibilnost, stabilnost, lakšu kontrolu frekvencije, potrebnu rezervu u kratko vrijeme, integraciju obnovljivih izvora energije, itd. Hidroelektrane, također, omogućuju i proizvodnju električne energije značajno jeftinije od konvencionalnih elektrana te se time s pravom mogu svrstati u rang s obnovljivim izvorima energije kao što su vjetar i sunce. [4]–[6]

U tu svrhu, kako bi se još bolje upoznao odnos vode i elektroenergetskog sektora, izrađen je i ovaj diplomski rad. U njemu je korištenjem prikupljenih ulaznih podataka te različitih modela pokazan kakav je utjecaj hidrologije na rad hidroelektrana te time posljedično i na elektroenergetski sustav. Kako bi se doprinijelo daljnjoj integraciji hidroelektrana te znali koji su mogući izazovi elektroenergetskih sustava u budućnosti, u modelu su prema *Strategiji energetske razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu* [7] integrirani i različiti udjeli obnovljivih izvora energije te je promatrano kako i na koji način će se to odraziti na proizvodnju električne energije iz hidroelektrana. Ulazni podaci i model predstavljeni su u nastavku diplomskog rada.

1.1. Energija u Svijetu

Danas se pred elektroenergetskim sektorom pojavljuju novi ciljevi, izazovi i očekivanja. Kao najvažniji ciljevi ističu se postizanje CO₂ neutralnosti integracijom obnovljivih izvora te osiguranje stabilnosti i fleksibilnosti sustava u tim uvjetima. Budući da se utjecaj klimatskih promjena sve više ističe, vremena za djelovanje je sve manje te je stoga važno kvantificirati potrebe za energijom te u budućnosti planirati sustave koji su održivi.

Kako bi se započelo s djelovanjem u tom pravcu na globalnoj razini, 194 države članice odlučile su se na sastavljanje *Pariškog sporazuma o klimatskim promjenama* [8]. Tim sporazumom jasno su definirani ciljevi i zahtjevi koji se žele postići, a to su:

- Zadržavanje povećanja globalne prosječne temperature na 2 °C iznad razine predindustrijskog razdoblja te poduzeti mjere u svrhu ograničavanja rasta globalne prosječne temperature iznad 1,5 °C iznad razina u predindustrijskom razdoblju
- Povećati sposobnost prilagodbe posljedicama klimatskih promjena i poticati smanjenje stakleničkih plinova na način kojim se ne ugrožava proizvodnja hrane
- Osigurati nove načine financiranja novih "zelenih" tehnologija koje smanjuju emisiju stakleničkih plinova i povećavaju otpornost na klimatske promjene
- Borba protiv energetske siromaštva, pomaganje zemljama trećeg svijeta u postizanju istih ciljeva te postizanje održivog razvoja na razini cijelog svijeta.

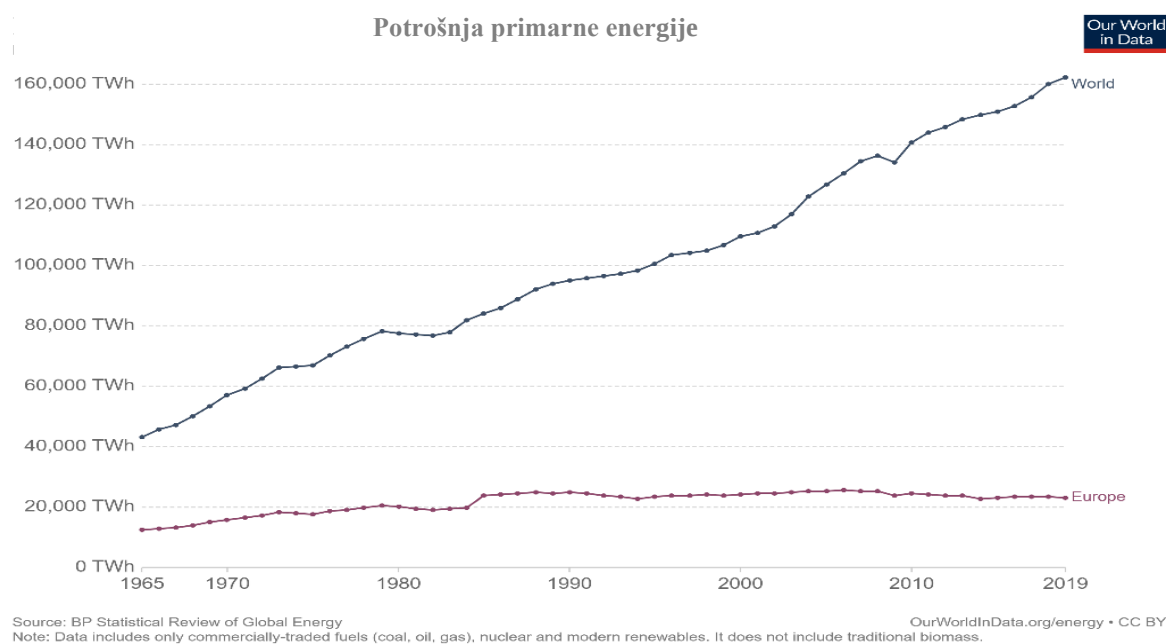
U konačnici, cilj je do kraja 21. stoljeća postići ugljičnu neutralnost, tj. u potpunosti anulirati emisije stakleničkih plinova na globalnoj razini.

U nastavku je dan pregled stanja potrošnje i proizvodnje energije u svijetu. Usporedno sa svijetom dan je i pregled stanja energije u Europi kako bi mogli biti prepoznati trendovi koji se pojavljuju. Kao referentni podaci korišteni su podaci iz 2019. godine. Razloga tomu je više, naime, u 2019. godini dostupni su posljednji cjeloviti podaci te je 2020. godina obilježena pandemijom korona virusa koja je prouzročila mnoge posljedice pa tako i u sektoru energetike (pad proizvodnje i potrošnje energije). [9], [10]

1.1.1. Potražnja energije

Prema dostupnim podacima još uvijek postoji oko milijardu ljudi na svijetu koji nemaju pristup organiziranom i ciljanom korištenju energije i energenata. [11] Najčešće je to slučaj u nerazvijenim zemljama trećeg svijeta kao što su velikim dijelom države Afrike, pojedini dijelovi Azije i Južne Amerike. Kako bi se poboljšao životni standard tih područja, razvijene zemlje osjećaju se pozvanima pomoći tim zemljama osobito u ostvarivanju ciljeva Pariškog sporazuma, navedenih u prethodnom poglavlju. No, kako svijest o potrebnoj energetskej tranziciji dolazi sve više u fokus, važno je obratiti i pozornost na tehnologije koje se primjenjuju u omogućavanju pristupa energiji korisnicima.

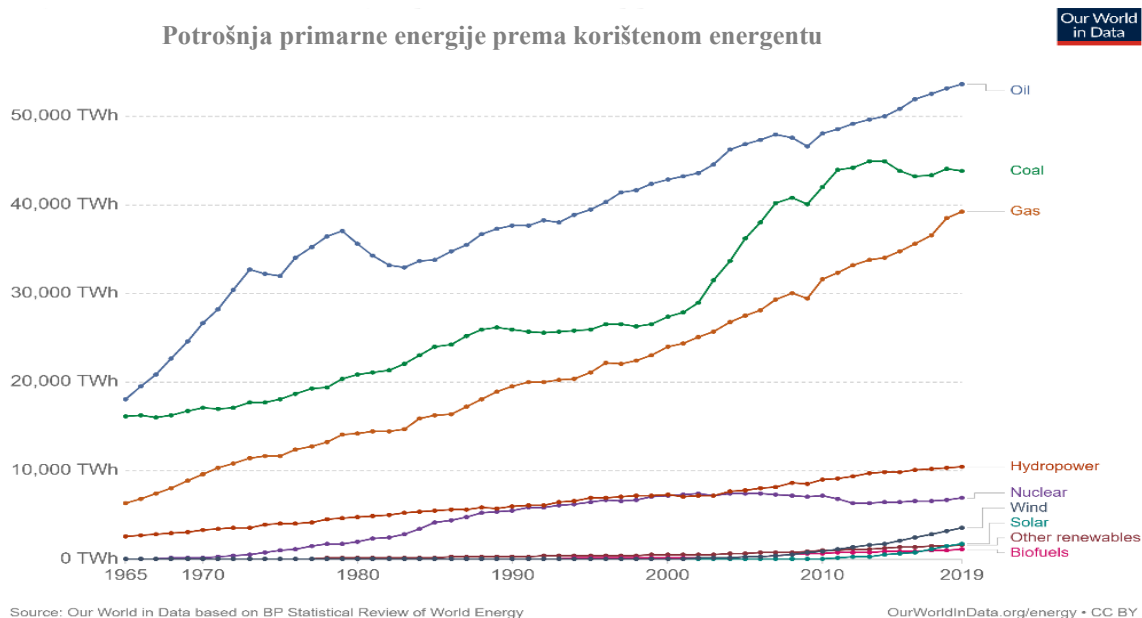
U svrhu postizanja boljeg životnog standarda država trećeg svijeta te ga se održavalo na željenoj razini, potrebna su energetska ulaganja što za posljedicu ima povećanje globalne potrošnje primarne energije. Primarna energija je energija uzeta iz prirode bez pretvorbe ili procesa transformacije, obuhvaća i potrošnju energije iz industrijskog, transportnog sektora i sektora zgradarstva. Takav trend je uočljiv na Slika 1, gdje je potrošena primarna energija tijekom prošlih desetljeća rasla. Najveći doprinos tome imaju zemlje u razvoju, poput Kine, Indije, Brazila te pojedinih zemalja Afrike. Današnja globalna potrošnja za primarnom energijom procjenjuje se na iznos od oko 160 000 TWh, što je gotovo duplo više od potrebne primarne energije u 90 – tim godinama prošlog stoljeća.



Slika 1 Potrošnja primarne energije - Svijet i Europa [12]

S obzirom da Republika Hrvatska pripada Europi, prikazano je i gdje se Europa smjestila na toj ljestvici. Europska potreba za primarnom energijom iznosi oko 20 000 TWh te taj trend nema tendenciju promijene. Razlog tomu leži u činjenici da je Europa visok stupanj razvijenosti postigla značajno ranije te je trenutno u poziciji provođenja politika kojim bi razinu potrošnje održavala konstantnom ili čak smanjila (npr. primjena mjera energetske učinkovitosti). [13] Značajan skok na Europskoj razini se događa tijekom 90 – tih godina, nakon raspada komunizma te izlaskom tih zemalja na slobodna europska tržišta. [12]

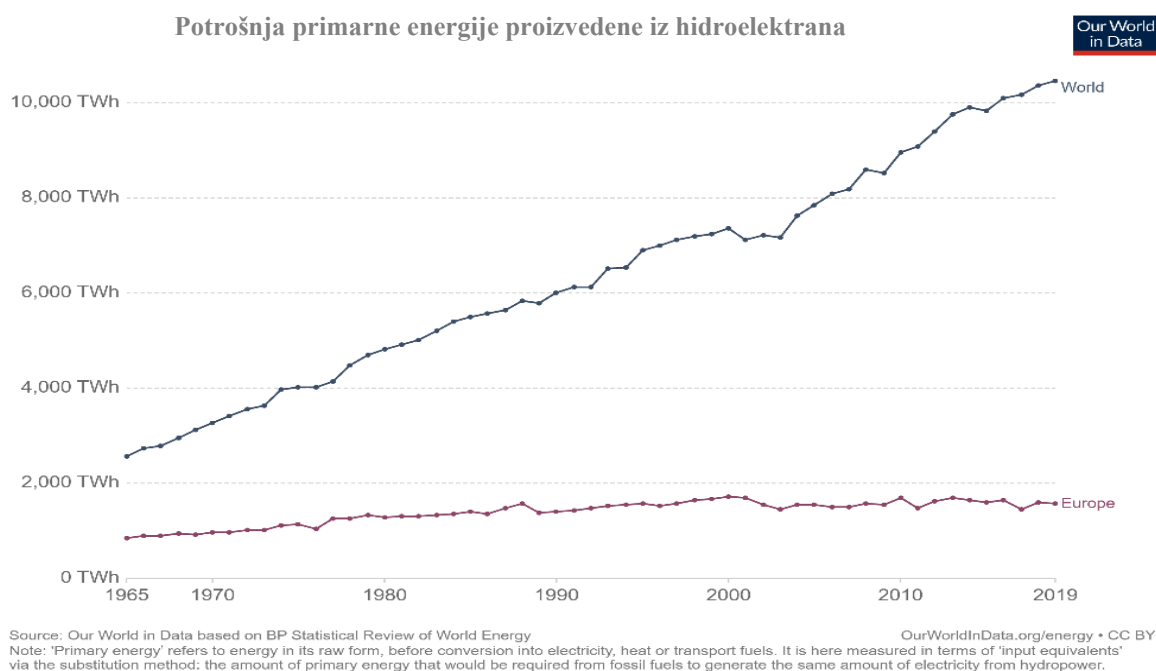
Kako bi se postigli ciljeve energetske tranzicije, no u isto vrijeme mogla zadovoljiti potražnja za energijom na globalnoj razini, potrebno je razlučiti kojim se resursima i tehnologijama koristimo te se to može vidjeti na Slika 2. Tako je danas ukupno 85 %, tj. 136 000 TWh primarne energije dobiveno korištenjem fosilnih goriva i tehnologija vezanih uz njih te to otvara široko područje na kojem je potrebno djelovati i ostvariti značajne pomake prema prelasku na alternativne načine proizvodnje energije. Ono što je također primjetno jest i polagani rast obnovljivih izvora energije od 2010. godine. Primjenom novih tehnologija u budućnosti može se očekivati značajni i brži rast. S obzirom da je jedan od fokusa ovog diplomskog rada, rad hidroelektrana, bitno je prepoznati i položaj hidroenergije na dijagramu. Danas 6,5 %, tj. 10 000 TWh, primarne energije je dobiveno iz hidroelektrana, uz rastući trend krivulje. [12]



Slika 2 Potrošnja primarne energije prema korištenom energentu - Svijet [12]

Opće prihvaćeno mišljenje da je globalni potencijal proizvodnje energije iz hidroelektrana od 40 000 do 52 000 GWh godišnje. Ostvarivanjem punog potencijala proizvodnje energije iz hidroelektrana 33 % potreba za energijom na globalnoj razini zadovoljavalo bi se iz hidroenergije. [14]

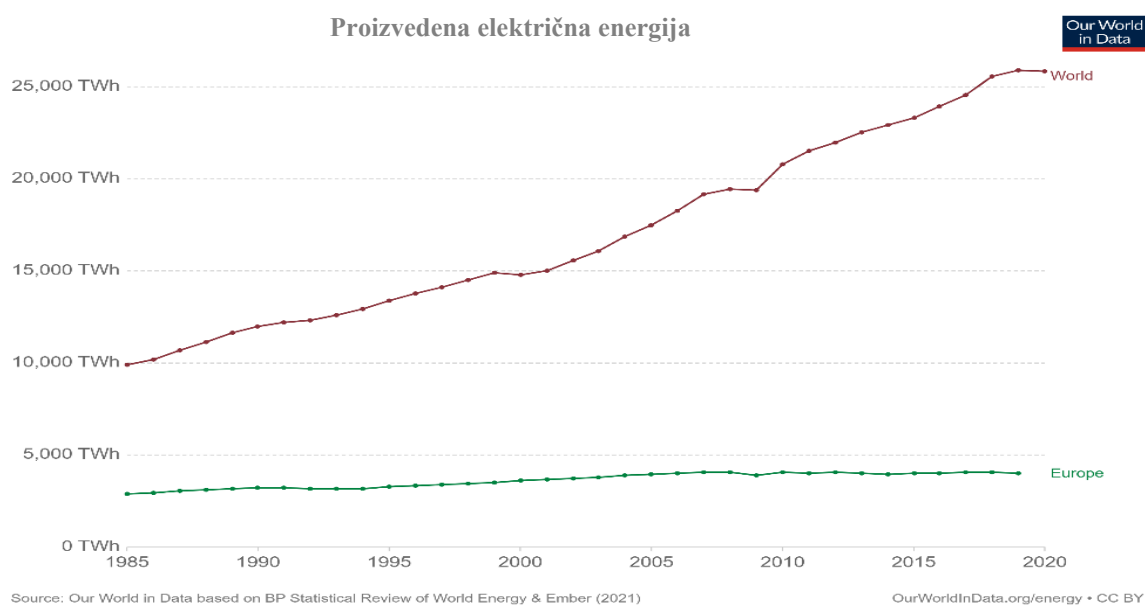
Na svjetskoj razini bilježimo rast potrošnje primarne energije iz hidroelektrana što govori da i dalje hidroenergetski potencijal nije u cijelosti iskorišten te da ima mjesta za dodatni napredak i razvijanje. No, također, daje i važnu činjenicu kako hidroenergija postaje prepoznatljiva, ne samo u energetsom smislu, nego i smislu očuvanja i uređenja okoliša. S druge strane na europskom kontinentu bilježimo stagnaciju potrošnje primarne energije iz hidroelektrana, što znači da je europski kontinent važnost hidroenergetskog potencijala prepoznao i ranije te ga već dugi niz godina visokoučinkovito iskorištava.



Slika 3 Potrošnja primarne energije proizvedene iz hidroelektrana – Svijet i Europa [12]

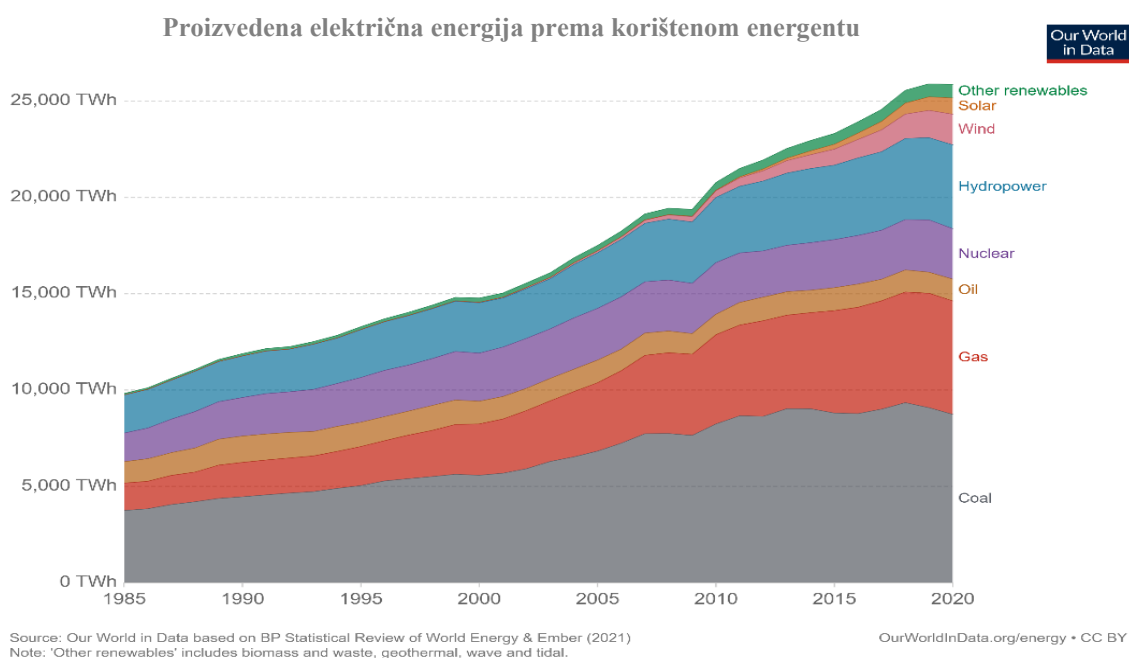
1.1.2. *Proizvodnja električne energije*

Kako bi se bolje uočio utjecaj vode na elektroenergetske sustave, fokus je postavljen na područje gdje se energija vode najčešće koristi, a to je proizvodnja električne energije. Tako se prema Slika 4 vidi kako proizvodnja električne energije na svjetskoj razini raste, te trenutno iznosi 20 000 TWh. Zbog već navedene činjenice, razvijanja zemalja trećeg svijeta, te ubrzane elektrifikacije različitih gospodarskih sektora i usluga, može se očekivati nastavak trenda rasta proizvodnje električne energije. Prema navedenim podacima Europa u svjetskoj proizvodnji električne energije sudjeluje s 15 % udjela, tj. s 4 000 TWh, bez tendencije raste proizvodnje. [12]



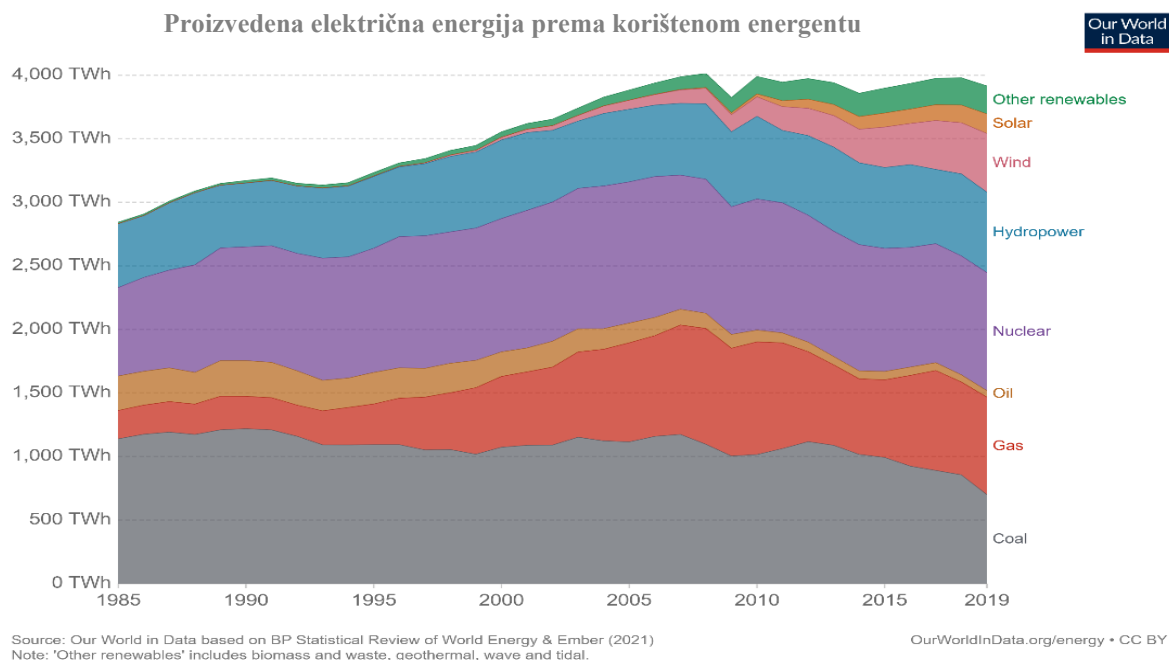
Slika 4 Proizvedena električna energija - Svijet i Europa [15]

No ono što Europu čini drugačijom od ostatka Svijeta jest raznovrsnost tehnologija iz kojih se proizvodi električna energija. Dok je na svjetskoj razini i dalje visok udio proizvodnje iz elektrana na fosilna goriva, poput elektrana na ugljen, naftu, s još uvijek tendencijom rasta ili blagog pada, u Europi se bilježi nagli pad proizvodnje električne energije iz elektrana na fosilna goriva. Uz zacrtane ciljeve i planove, taj trend će se nastaviti do nestanka proizvodnje energije iz fosilnih izvora energije i postizanja ugljične neutralnosti. [15]



Slika 5 Proizvedena električna energija prema korištenom energentu – Svijet [15]

Iz Slika 5 i Slika 6, vidi se da proizvodnja električne energije iz hidroelektrana na svjetskoj razini raste, dok na europskoj razini ona stagnira.



Slika 6 Proizvedena električna energija prema korištenom energentu – Europa [15]

Iz ovog pregleda stanja korištenja energije te proizvodnje električne energije može se reći kako se svijet još uvijek razvija te otvara nove tržišne mogućnosti i potrebe koje je potrebno

zadovoljiti. Uočljivo je kako je voda kao energent te hidroelektrane kao način iskorištavanja tog energenta prepoznat kao vrlo važan čimbenik i sudionik tog tržišta. Hidroelektrane imaju svoje mjesto, kako u sadašnjosti, tako i u budućnosti te je stoga vrijedno i dalje razvijati tehnologije iskorištavanja hidroenergetskog potencijala te provoditi istraživanja u tu svrhu.

1.2. Energija u Republici Hrvatskoj

S obzirom da je tema ovog diplomskog rada utjecaj hidrologije na proizvodnju hidroelektrana na području Hrvatske, dan je pregled energetske potrošnje i proizvodnje električne energije u Hrvatskoj zasebno.

1.2.1. Potrošnja energije

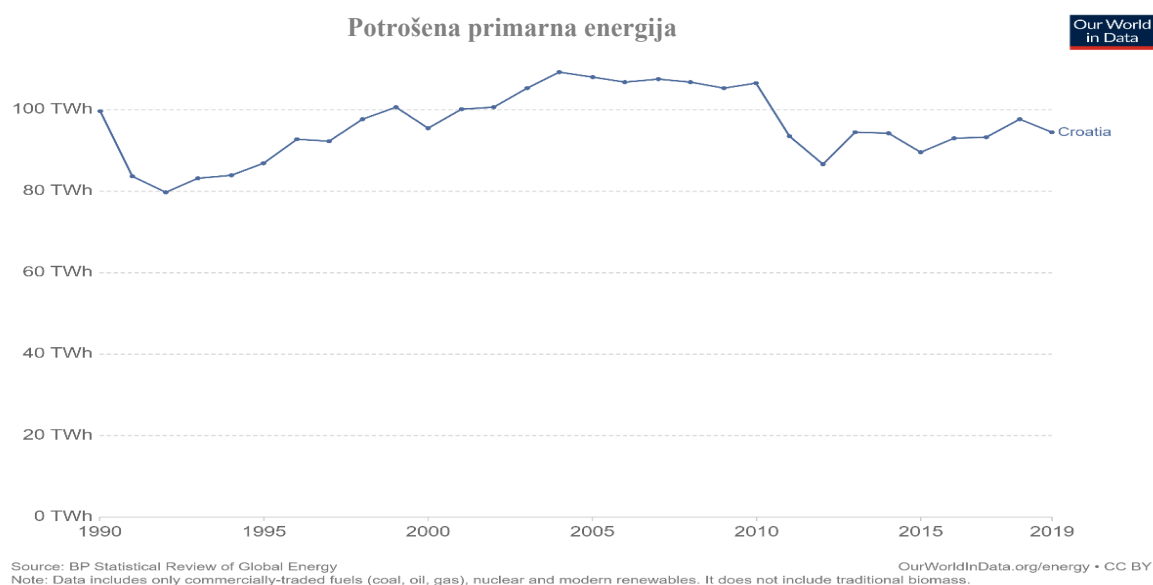
Potrošnja primarne energije u Hrvatskoj može se podijeliti na više razdoblja i čimbenika koji su utjecali na nju. Dostupni podaci za ovu analizu su od 1990. – te godine te se mogu podijeliti na pet razdoblja:

- Razdoblje Domovinskog rata – od 1991. do 1995.
- Razdoblje obnove i gospodarske tranzicije – od 1996. do 2004.
- Razdoblje stagnacije – od 2005. do 2008.
- Razdoblje gospodarske krize – od 2009. do 2013.
- Razdoblje oporavka – od 2013. do danas.

U razdoblju Domovinskog rata dolazi do naglog pad potrošnje primarne energije, razlozi leže u velikoj okupiranoj površini teritorija kao i u činjenici da su mnoga energetska postrojenja odcjepljena od energetske čvorovišta te da je elektroenergetski sustav imao mnoge prekide u mreži. Nakon Domovinskog rata uslijedilo je razdoblje gospodarskog rasta i obnova industrijskih postrojenja koje bilježi i rast potrošnje energije. Taj trend bilježi se sve do 2004. godine kada nastupa stanje stagnacije te potrošnja energije tijekom razdoblja od 4 godine ostaje približno nepromijenjena. Nastupanjem velike svjetske gospodarske krize, događa se značajan pad u potrošnji energije zbog gašenja mnogih industrijskih postrojenja te tvrtki vezanih uz njih. Gospodarstvo Hrvatske snažno je pogođeno tom krizom te je vrlo teško odgovaralo na izazove nastale gospodarske krize, što rezultira razdobljem nestabilnosti, kako gospodarske tako i energetske potrošnje. Važan događaj za hrvatsko gospodarstvo jest ulazak u Europsku Uniju 2013. godine. Nakon ulaska u Europsku Uniju, Hrvatska izlazi iz gospodarske krize 2014. godine te nastupa razdoblje gospodarskog oporavka i rasta. Uslijed oporavka gospodarska

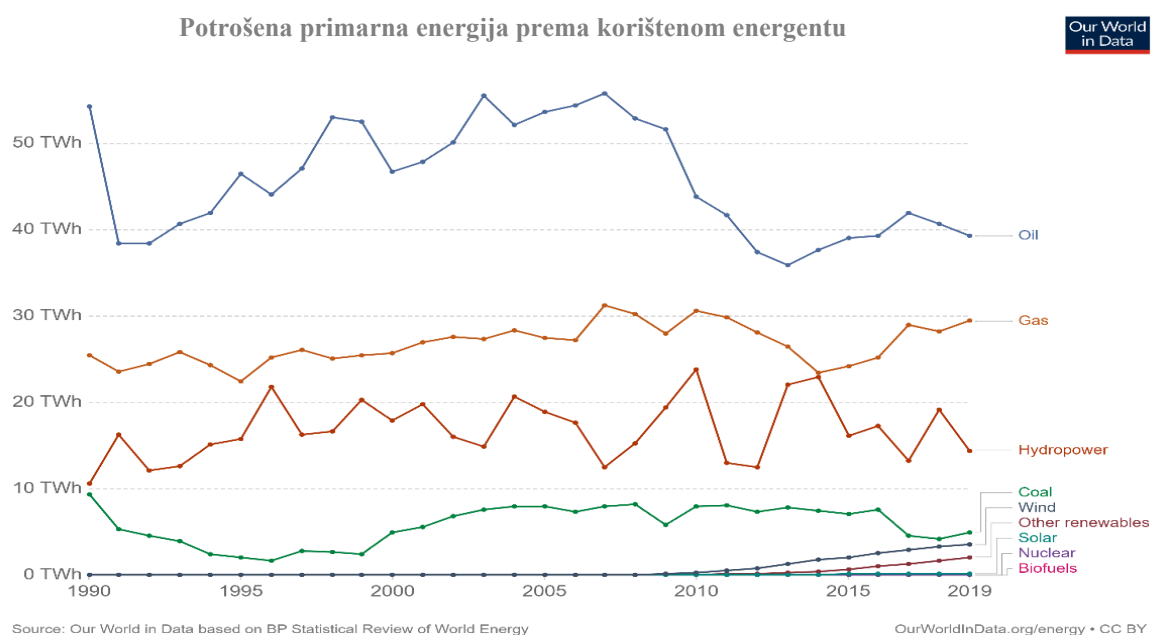
potrošnja energije počinje blago rasti no još nije postiže razinu potrošnje kakva je bila u razdoblju prije gospodarske krize 2008. godine. [12], [15], [16]

Zbog nedostupnosti podataka za 2020. godinu još uvijek se ne može reći sa sigurnošću kakav utjecaj će imati pandemija korona virusa na potrošnju primarne energije, no zasigurno je da će u tom razdoblju biti značajan pad potrošnje energije. Naravno, utjecaj pandemije uvelike će ovisiti politici gospodarskog oporavka te će time neizravno biti i određena potrošnja energije tog razdoblja. [10]



Slika 7 Potrošnja primarne energije – Hrvatska [12]

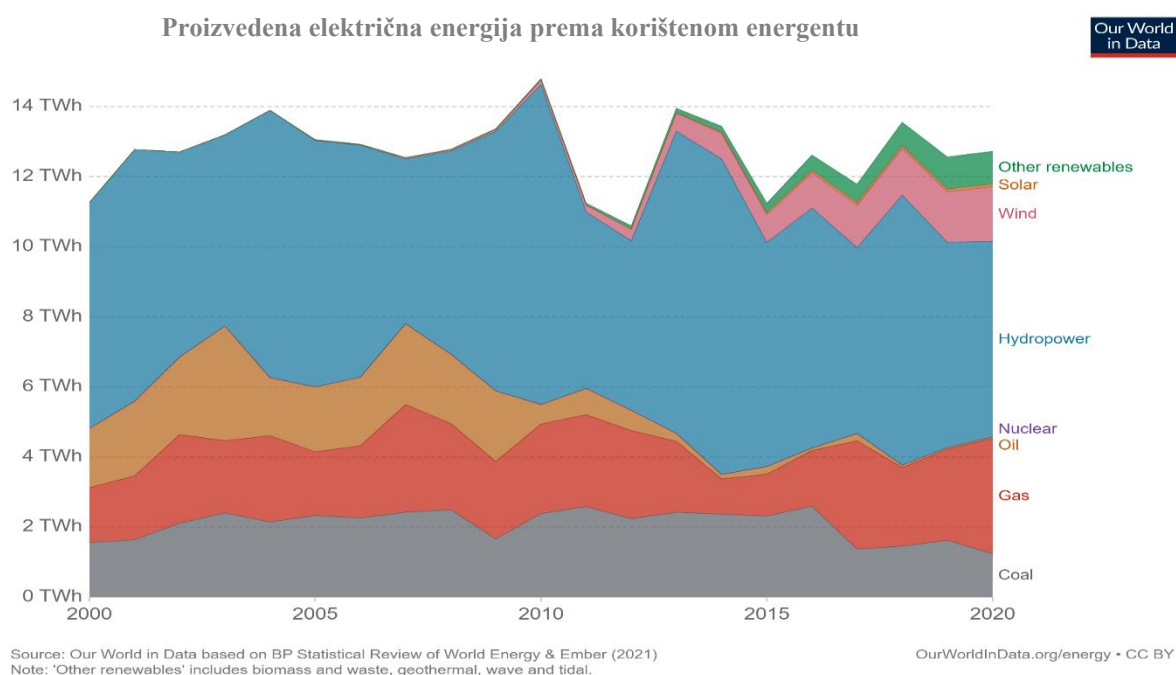
Potrošena primarna energija u Hrvatskoj iznosi oko 95 TWh godišnje te je ona osigurana iz različitih energetske izvora. Kao najčešće korišteni energent je nafta s 43 % udjela u potrošnji primarne energije, zatim slijedi plin s 32 % u potrošnji primarne energije te je na trećem mjestu hidroenergija s 15 % udjela u potrošnji primarne energije. Udio energije koji se dobiva korištenjem hidroenergetskog potencijala jednak je europskom prosjeku te se može reći da je hidroenergetski potencijal u Hrvatskoj vrlo dobro iskorišten. Iskorištenost dolazi do izražaja i ako se promotri količina proizvedene električne energije prema korištenoj tehnologiji te je u nastavku diplomskog rada dan i uvid i u taj podatak. [12]



Slika 8 Potrošnja primarne energije prema korištenom energentu – Hrvatska [12]

1.2.2. *Proizvodnja električne energije*

Kako je već prikazano, velik dio proizvedene energije u Hrvatskoj dolazi iz hidroelektrana, no ako se fokus stavi na sektor proizvodnje električne energije uočljivo je kako je onda udio korištenja hidroenergetskog potencijala još veći u odnosu na udio u proizvodnji primarne energije. Naime, Hrvatska ukupno proizvodi 12,7 TWh električne energije, a 5,2 TWh električne energije dolazi iz hidroelektrana, što čini 41 % proizvodnje električne energije, naravno, uzimajući u obzir da proizvodnja iz hidroelektrana ovisi o hidrološkim uvjetima koji variraju svake godine. Prema Slika 9, udio proizvedene električne energije fosilnih elektrana se smanjuje te se ta proizvodnja nadomješta proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije. Hidroelektrane imaju te će u budućnosti dobiti još veći značaj u hrvatskom elektroenergetskom sustavu i činiti će značajnog sudionika prilikom energetske tranzicije u Hrvatskoj. [15], [17]



Slika 9 Proizvedena električna energija prema korištenom energentu – Hrvatska [15]

S obzirom na takvo stanje, upravo je velik udio hidroelektrana u proizvodnji električne energije motivacija za izradu ovog diplomskog rada. Republika Hrvatska ima veliku perspektivu te mogućnosti u postizanju energetske tranzicije, ponajviše zahvaljujući svom položaju te bogatstvu resursa koje posjeduje. U budućnosti se može očekivati da fosilna goriva više neće biti relevantan čimbenik na hrvatskom energetsom tržištu, stoga se postavlja pitanje kakvu će ulogu time dobiti hidroelektrane u energetsom sustavu. Odgovor na to pitanje dan je u diplomskom radu.

2. HIDROLOGIJA REPUBLIKE HRVATSKE

Republika Hrvatska, tj. njen teritorij, hidrografski se može podijeliti na dva sliva:

- Crnomorski sliv
- Jadranski sliv.



Slika 10 Podjela Hrvatske na slivove [18]

Granica između ovih dvaju slivova na području Hrvatske prati prirodnu hidrografsko – hidrogeološku vododijelnicu, tj. razvodnica između crnomorskog i jadranskog sliva nalazi se na planinskom području Like i Gorskog kotara ili općenitije rečeno ona prolazi od jugoistoka Like prema sjeverozapadu Gorskog kotara. [18]

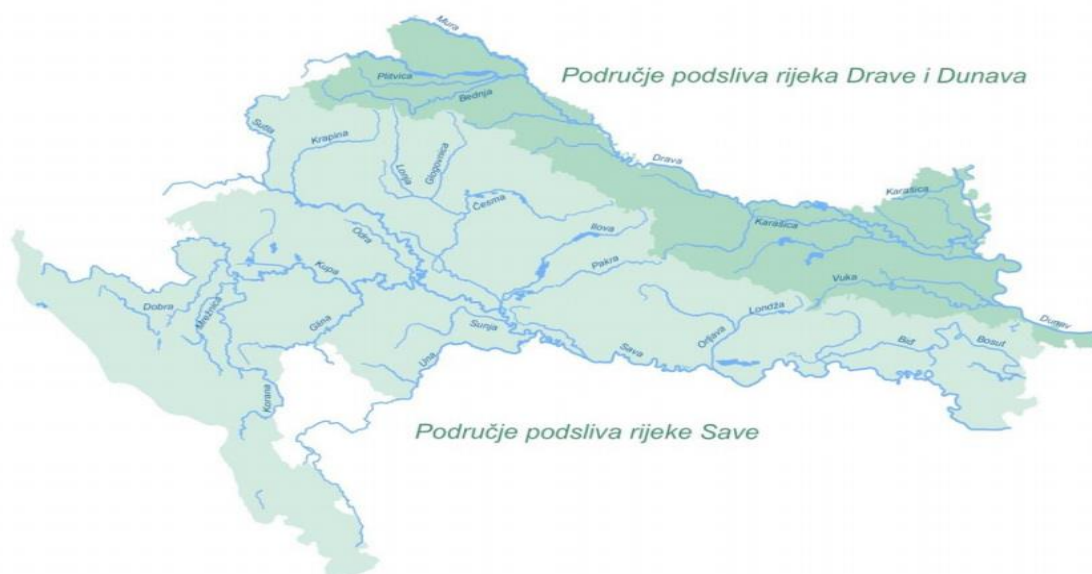
Prema Zakonu o vodama [19], članku 34., teritorij Hrvatske može se podijeliti i na dva vodna područja:

- Vodno područje rijeke Dunav
- Jadransko vodno područje.

Stoga kako bi se izbjegle zabune i nesuglasice u ovom diplomskom radu korištena je podjela na Crnomorski sliv te Jadranski sliv. U nastavku ovog poglavlja dan je pregled slivova s pripadajućim podslivovima koji su značajni za iskorištavanje hidroenergetskog potencijala u Hrvatskoj.

2.1. Crnomorski sliv

Crnomorski sliv obuhvaća veliko međunarodno područje teritorija, točnije, najveći dio balkanskog poluotoka, no za potrebe ovog diplomskog rada opisan je onaj dio sliva koji se nalazi u Hrvatskoj. U Hrvatskoj crnomorski sliv obuhvaća područje veličine 35 117 km², tj. 62 % teritorija Hrvatske, obuhvaća nizinsku (panonsku) Hrvatsku te područje sjeveroistočne gorske Hrvatske (sjeveroistok Gorskog kotara te jugoistok Like). [18]



Slika 11 Crnomorski sliv u Hrvatskoj [20]

Crnomorski sliv na području Hrvatskoj dijeli se na tri podsliva, a to su:

- Podsliv rijeke Dunav
- Podsliv rijeke Drave
- Podsliv rijeke Save.

Tri podsliva imaju vrlo velika slivna područja (većim od 10 000 km²), dok velika slivna područja (površine od 1 000 do 10 000 km²) imaju rijeke:

- Dobra, Korana, Glina – pritoci Kupe
- Krapina, Ilova, Pakra, Česma, Orljava, Bosut, Una – pritoci Save
- Karašnica, Vučica – pritoci Drave
- Baranjska Karašnica, Vuka – pritoci Dunava.

Na području crnomorskog sliva nalaze se još nekoliko srednjih slivova.

2.1.1. Podsliv rijeke Drave

Rijeka Drava je četvrti najveći i najduži pritok slivnog područja rijeke Dunav, površina sliva iznosi 40 087 km², a duljina rijeke 719 km. Prosječan protok vode na ušću rijeke iznosi 620 m³/s. Područje sliva obuhvaća područja: Italije, Austrije, Slovenije, Mađarske i Hrvatske. Procjenjuje se da u slivnom području rijeke Drave živi oko 3,6 milijuna ljudi. [21]–[24]

Rijeka izvire u južnim Alpama, u Italiji, te u svega nekoliko prvih kilometara bilježi pad u nadmorskoj visini od 400 m. Zatim ulazi u Austriju, gdje protječe istočnim Tirolom te dijeli središnje Alpe od vapnenačkih Alpi. Kroz Sloveniju protječe od sjeverozapada prema jugoistoku te ulazi u Hrvatsku kod sela Lovrečan, u blizini grada Varaždina. Najveći pritoci rijeke Drave su rijeke: Isel, Moll, Lieser, Gurk te rijeka Mura, koja ujedno svojim tokom čini i prirodnu granicu između Hrvatske i Slovenije. [21]–[23]

Klima kroz koju protječe umjereno je kontinentalna klima s većom količinom oborina, prosječna okolišna temperatura oko rijeke iznosi 10,9 °C. Godišnji prinos padalina je između 600 do 750 mm. Najveći oborinski prinos je u ožujku i travnju zbog otapanja snijega na alpskim vrhovima. Najmanji prinos oborina je tijekom lipnja i srpnja. Rijeka Drava ima veliki potencijal plavljenja te su zato u područjima Drave, gdje je visoka gustoća naseljenosti, izgrađeni protupoplavni sustavi (brane, nasipi, itd.). [21], [23]

Rijeka Drava ima vrlo velik hidroenergetski potencijal te je na njoj dosad izgrađeno 23 hidroelektrane, od toga ih je 12 u Austriji, 8 u Sloveniji te 3 u Hrvatskoj. U Hrvatskoj to su hidroelektrane: HE Varaždin, HE Čakovec te HE Donja Dubrava. [21], [25]

U Hrvatskoj, na prvih 100 kilometara, izgrađene su tri hidroelektrane. Nakon toga, rijeka čini prirodnu granicu između RH i Mađarske, u dužini od 95 km. Zatim skreće prema Osijeku, prolazi kroz grad te se kod Aljmaša, na granici sa Srbijom ulijeva u Dunav. Plovidba rijekom moguća je tijekom 250 do 260 dana godišnje te je od Osijeka do ušća rijeke proglašena

međunarodnim plovnim putem. Od ulaska u Hrvatsku pa sve do posljednje hidroelektrane (HE Donja Dubrava) korito rijeke je uređeno za svrhe bolje energetske iskoristivosti, uz pomnu brigu o očuvanju i starog korita rijeke. [21], [25]

2.1.2. Podsliv rijeke Kupe

Rijeka Kupa je rijeka duljine 296 km, čiji se izvor i ušće nalaze u Hrvatskoj. Rijeka izvire u krškom jezeru, na području Nacionalnog parka Risnjak u Gorskom kotaru, na nadmorskoj visini od 321 m, a ulijeva se u rijeku Savu kod Siska. Visinska razlika između izvora i ušća iznosi 227 m. Dijelom svoga toka čini prirodnu granicu između teritorija Hrvatske i Slovenije. [24], [26]–[28]

Površina sliva rijeke Kupe iznosi 9 202 km², površinski veći dio sliva nalazi se na teritoriju Hrvatske, dok jedan manji dio nalazi se na teritoriju Slovenije. Sliv rijeke Kupe naziva se još i Pokuplje. Područja koja sliv obuhvaća mogu se podijeliti na slivno područje gornjeg i donjeg toka. Slivno područje gornjeg toka čine manji slivovi rijeka Lahinje, Dobre, Mrežnice, Korane te je to ujedno dio toka koji teče krškim područjem. Slivno područje donjeg toka čine vode Žumberka, Vukomeričkih gorica, Karlovački bazen te vode Petrove i Zrinske gore. Srednji godišnji prinos oborina na području sliva iznosi 1 371 mm, a srednji godišnji protok rijeke na ušću iznosi 228 m³/s. Srednja godišnja temperatura rijeke iznosi 7 °C. [26]–[29]

Rijeka Kupa tijekom svoga toka ima više pritoka, a glavni pritoci su Kupica, srednjeg protoka 14,7 m³/s, rijeka Dobra, srednjeg protoka, 40,1 m³/s, rijeka Korana, srednjeg protoka 58,9 m³/s te rijeka Glina, srednjeg protoka 15 m³/s. [26], [27], [29]

Hydroenergetski potencijal rijeke Kupe prepoznat je početkom 20. stoljeća kada je izgrađena prva hidroelektrana (HE Ozalj I, tzv. "Munjara grada Karlovca"). Na rijeci se nalaze još četiri hidroelektrane: HE Ozalj II (na samoj rijeci Kupi), HE Gojak (na slivnom području Kupe, tj. na Ogulinskoj i Gojačkoj Dobri), HE Lešće (na slivnom području Kupe, tj. na rijeci Dobri) te HE Zeleni Vir (na slivnom području Kupe, tj. na potoku Curak) . Na slivnom području rijeke Kupe razmatrana je izgradnja još 26 hidroelektrana. [25], [26], [28]

2.2. Jadranski sliv

Jadranski sliv u Republici Hrvatskoj dio je šireg međunarodnog slivnog područja naziva sliv Jadranskog mora. Tom slivu pripadaju područja: dio Italije, Slovenije, Hrvatske, Crne Gore, Albanije, Kosova te Grčke. Za jadranski sliv u Hrvatskoj od velikog su značaja pogranične i prekogranične vode međunarodnog značaja. Sliv se sastoji od više slivova ili dijelova slivova jadranskih rijeka s pripadajućim podzemnim i prijelaznim vodama. Površina jadranskog sliva u RH iznosi 35 303 km², što je oko 40 % ukupnog teritorija države. Od ukupnog iznosa površine sliva 18 183 km² otpada na kopno, 3 262 km² otpada na otoke, a na prijelazne i priobalne vode otpada 13 858 km². Granična rijeka jadranskog sliva sa Slovenijom je rijeka Dragonja, dok je rijeka Neretva najveća prekogranična rijeka s više od 90 % površine na teritoriju Bosne i Hercegovine. U odnosu na rijeke crnomorskog sliva, rijeke jadranskog sliva su kraćih površinskih tokova te ih karakterizira često poniranje čineći tako podzemne tokove. Rijeke jadranskog sliva vrlo često su povezane sustavima prirodnih podzemnih tokova, karakteriziraju ih i česta sušna razdoblja nadzemnih tokova, dok sustavi podzemnih vodotokova ne presušuje te omogućuju preživljavanje ribama i drugih organizmima. [18], [30], [31]



Slika 12 Jadranski sliv [18]

Jadranski sliv na području RH dijeli se na dva podsliva, a to su:

- Primorsko – istarski sliv
- Dalmatinski sliv.

U jadranskom slivu, Neretva je vodotok s vrlo velikim slivom, dok se rijeke poput Like, Zrmanje, Krke i Cetine ubrajaju u velike slivove. Također, na području jadranskog sliva nalazi se još 40 – tak slivova srednje veličine. [18], [30], [31]

2.2.1. Primorsko – istarski sliv

2.2.1.1. Podsliv rijeke Rječine

Rječina je rijeka koja se nalazi na Kvarnerskom primorju, izvor joj se nalazi u krškoj špilji te rijeka nastaje prelijevanjem preko umjetne betonske pregrade visine 5 m. Izvor rijeke se nalazi na nadmorskoj visini od 326 m. Od izvora do ušća rijeke, rijeka se proteže duljinom od 18,6 km kroz strmi krški kanjon, prosječne širine je od 6 do 9 m. Ušće rijeke nalazi se u Riječkom zaljevu. [32], [33]

Površina sliva rijeke Rječine iznosi 54 km², najveći pritoci tog sliva su potoci Sušica, koji prikuplja vode Grobničkog polja, Lužac, Zala, Zahumčica, Golubinka, Ričnica i Borovščica. Baš kao i rijeka Rječina, svi pritoci rijeke, su bujičnog karaktera, uz iznimku da pritoci tijekom ljetnih mjeseci presušuju. [33]

Prosječni godišnji protok iznosi 7,89 m³/s. [33]

Hidroenergetski potencijal Rječine prepoznat je početkom 20. stoljeća, no korištenje potencijala započinje tek 50 – tih godina prošlog stoljeća. Na Rječini se nalazi akumulacijsko jezero Valići, zapremnine 470 000 m³, za potrebe HE Rijeka. Akumulacijsko jezero čini donju energetska stepenicu iskorištavanja Rječine. Planirana je i gornja energetska stepenica gradnjom HE Valići i akumulacijskog jezera Zoretići, zapremnine 15,5 milijuna m³. [25], [34], [35]

2.2.1.2. Podsliv rijeke Lokvarke

Rijeka Lokvarka je rijeka ponornica, nalazi se u Gorskom kotaru. Rijeka izvire kod naselja Lokve, te je čini tok duljine 5,2 km. Ulijeva se kod naselja Homera u Lokvarsko jezero. [36]

Na rijeci Lokvarki, u hidroenergetske svrhe, napravljeni su veliki zahvati za uređenje. Uređenje toka rijeke započelo je 1950. godine te je tok rijeke većim dijelom uređen i

kontroliran. Na samoj rijeci je izgrađeno i umjetno akumulacijsko jezero Lokvarka kojim se izravnavaju protok rijeke Lokvarke. Površina jezera iznosi 2 km^2 , nalazi se na nadmorskoj visini od 767 m, prosječne dubine je oko 40 m. Korisni volumen jezera iznosi 33,8 milijuna m^3 vode. Akumulacijsko jezero spojeno je čeličnim cjevovodom, duljine 3 459,5 m, s akumulacijskim jezerom Bajer. Zajedno s vodama rijeke Ličanke te jezerom Bajer, jezero Lokvarka čini dio Hidroenergetskog sustava Vinodol. [25], [36]–[38]

2.2.1.3. Podsliv rijeke Ličanke

Rijeka Ličanka je rijeka ponornica, nalazi se Gorskom kotaru. Rijeka izvire ispod mjesta Rogozna i Petehovca. Duljina toka rijeke iznosi 20,4 km te tijekom svoda toka prolazi kroz mjesto Fužine. Rijeka ponire u Ličkom polju kod Liča te ponovo izbija, pod imenom Dubračina, u mjestu Vinodol i Crikvenici, gdje se ulijeva u Jadransko more. Slivno područje rijeke Ličanke iznosi oko 54 km^2 . [39]

Hidroenergetski potencijal rijeke iskorištava se od 50 – tih godina prošlog stoljeća izgradnjom brane te stvaranjem umjetnog jezera Bajer. Jezero Bajer površine je $0,36 \text{ km}^2$, nalazi se na nadmorskoj visini od 717 m te ima korisni volumen od 1,25 milijuna m^3 . Kako je već navedeno, jezero Bajer spojeno je s akumulacijskim jezerom Lokvarka cjevovodom te crpnom hidroelektranom (CHE) Fužine. [25]

1987. godine izgrađeno je još jedno akumulacijsko jezero Lepenica na rijeci Ličanki i potoku Lepenica. Nalazi se nedaleko jezera Bajer te je cjevovodom spojeno s njime. Jezero je površine $0,45 \text{ km}^2$ te se nalazi na nadmorskoj razini od 730 . Korisni volumen jezera Lepenica iznosi 3,8 milijuna m^3 . Izgradnjom akumulacijskog jezera Lepenica poboljšano je energetska iskorištavanje voda ovog područja i ujedno spriječeno prelijevanje jezera Bajer. Zajedno s jezerom izgrađena je i CHE Lepenica. [25]

2.2.1.4. Podsliv rijeke Like

Rijeka Lika je rijeka ponornica koja izvire u podnožju Velebita na nadmorskoj visini od 596 m. Tok rijeke duljine je 78 km, od čega većim dijelom teče kroz Ličko polje. Područje sliva rijeke iznosi oko 1 125 km², prosječni godišnji protok iznosi 28 m³/s. Slivno područje većim dijelom nalazi se na nadmorskoj visini od 480 m. Glavni pritoci rijeke Like su Novčica, Otešica, Glamočnica i Jadova. Rijeka Lika ima velike varijacije u protocima tijekom ljetnog razdoblja godine kada su oni nižeg iznosa (i do 1 m³/s). Maksimalni godišnji protoci dosežu iznose do 50 m³/s. [40], [41]

Hidroenergetski potencijal rijeke Like iskorištava se od 1965. kada je rijeka umjetno odsječena od ponora u Lipovu polju te spojena cjevovodom s rijekom Gackom. Pregrađivanjem kanjona rijeke izgrađeno umjetno akumulacijsko jezero Kruščica te HE Sklope. Akumulacijsko jezero Kruščica nalazi se u Kosinju te je korisnog volumena 128 milijuna m³. [25], [42]

2.2.1.5. Podsliv rijeke Gacke

Rijeka Gacka je rijeka ponornica, toka duljina 61 km. Izvire u više vrela (Tonkovićevo vrelo, Majerovo vrelo), prolazi kroz Gacko polje (naselje Otočac) te se ulijeva u Jadransko more. Slivno područje rijeke Gacke iznosi 584 km². Rijeka tijekom svog toka ima mnogo manjih pritoka. Prosječni godišnji protok vode iznosi 14,63 m³/s te je ujednačenog protoka tijekom cijele godine. Prosječna temperatura vode tijekom ljeta iznosi 10,8 °C, a zimi ona iznosi 7,9 °C. [24], [41], [43]

Hidroenergetski potencijal rijeke Gacke iskorištava se od 1965. godine spajanjem s rijekom Likom, skraćivanjem toka rijeke sa 100 km na današnjih 61 km duljine te izgradnjom HE Senj. [25]

2.2.2. Dalmatinski sliv

2.2.2.1. Sliv rijeka Neretva – Trebišnjica

Sliv rijeke Neretve obuhvaća površinu od 10 380 km² te se nalazi na području Hrvatske i Bosne i Hercegovine. Ukupna duljina rijeke iznosi 230 km, od kojih se samo 22 km nalazi u Hrvatskoj. Izvor rijeke nalazi se na 1 095 m nadmorske visine ispod planina Zelengore i Lebršnik u Bosni i Hercegovini. Od izvora rijeka otječe prema istoku, prolazeći kroz grad Metković, Opuzen, zatim Ploče te u konačnici čini delta ušće, površine 200 km², i ulijeva se u Jadransko More. Od grada Metkovića rijeka Neretva je plovna. [44]–[46]

Rijeka Neretva je najveća krška rijeka u Dinarskom gorju te je hidrološki povezana s rijekom Trebišnjicom. Rijeka ima vrlo velik godišnji doprinos oborina, no zbog krškog reljefa ima velike gubitke zbog podzemnih tokova i spilja te je time površinski tok rijeke značajno smanjen. Najveći doprinos oborina je u prosincu, a najmanju tijekom lipnja, srpnja i kolovoza. Rijeka Neretva ima vrlo velik i značajan hidroenergetski potencijal te je on u velikoj mjeri i iskorišten. Na rijeci se nalazi pet hidroelektrana, no nijedna se ne nalazi na teritoriju Hrvatske. Osim veliko hidroenergetskog potencijala, rijeka ima veliku ulogu za poljoprivredu te vodoopskrbu tog područja. [45]–[47]

Važnost rijeke Neretve za Hrvatsku, kako je već navedeno, leži u hidrološkoj povezanosti s rijekom Trebišnjicom čije se vode koriste u hidroelektranama Zavrelje i Dubrovnik.

Sliv rijeke Trebišnjice vrlo je bogat vodom i obuhvaća područje površine oko 1 630 km² u istočnoj Hercegovini. Rijeka Trebišnjica je ponornica karakteristična za krške krajeve. Prosječne godišnje padaline iznose oko 1700 mm. Karakteristično za to područje je razdoblje od jeseni do proljeća koje je vrlo bogato vodom i ljetno razdoblje s oskudicom vode, kada se pojavljuju i sušna razdoblja u trajanju i do 90 dana. Središnji godišnji protok vode iznosi 94 m³/s. Rijeka Trebišnjica ima samo dva pritoka, a to su rijeke Čepelić i Sušić. Vode sliva rijeke Trebišnjice kao i sama rijeka ulijevaju se u Jadransko more na području Dubrovnika i Župe Dubrovačke. [47], [48]

Planirana je izgradnja sedam hidroelektrana na rijeci Trebišnjici te je već dio plana realiziran. Za korištenje hidroenergetskog postrojenja na rijeci Trebišnjici izgrađeno je akumulacijsko jezero Bileća, volumena 1 060 milijuna m³. Ukupno su izgrađene četiri hidroelektrane, od toga su dvije na teritoriju Hrvatske: HE Dubrovnik te HE Zavrelje. Osim energetskog korištenja, energetski sustav na rijeci Trebišnjici ima zadaću obrane od poplava te navodnjavanja u poljoprivredi. [25], [48]

2.2.2.2. Podsliv rijeke Cetine

Rijeka Cetina je krška rijeka, izvire iz nekoliko, vodom bogatih, vrela u podnožju Dinare na sjevernom dijelu Cetinskog polja, kod Vrlike. Od izvora do ušća tok rijeke proteže se kroz 100,5 km krškog terena, te se u konačnici ulijeva u more kod grada Omiša. [24], [49]–[51]

Slivno područje rijeke obuhvaća područje veličine 4 160 km² te se nalazi u dvije države, Republici Hrvatskoj i Bosni i Hercegovini. U RH to područje obuhvaća vode Vrličkog, Koljanskog, Ribaričkog, Hrvatačkog te Sinjskog polja, kao i vode pritoka Rude. U Bosni i Hercegovini pritoci slivnom području čine vode Livanjskog polja s Buškim blatom, Duvanjsko, Šujičko, Kupreško te Glamočko polje. Zanimljiva je činjenica da se sva navedena geografska područja nalaze na nadmorskoj visini većoj od 700 m. Srednja godišnja visina oborina u slivu iznosi 1 400 mm. Protok rijeke Cetine povećava se od izvorišta do Trilja gdje postiže srednju godišnju vrijednost 107,5 m³/s. Od Trilja pa sve do ušća, rijeka ne prima nijedan značajan pritok. Oscilacije protoka tijekom godine su značajne te mogu se kretati od svega 7,4 do 415,4 m³/s. [49]–[51]

Zbog svog topografskog smještaja i raspoloživosti vodnih količina zajedno s vodotocima šireg sliva, rijeka Cetina predstavlja veliki energetske potencijal. S obzirom na tu činjenicu na rijeci je izgrađeno pet hidroelektrana: HE Peruća, HE Orlovac, HE Đale, HE Kraljevac i HE Zakućac. U tu svrhu na rijeci je izgrađeno više akumulacijskih jezera od kojih su najpoznatija akumulacijsko jezero Peruća, Đale i Prančević. Ove akumulacije su dio šireg međunarodnog plana hidroenergetskog iskorištavanja ovog područja, gdje su za potrebe energetskog iskorištavanja voda izgrađene i akumulacije u susjednoj Bosni i Hercegovini (akumulacija Buško Blato, kompenzacijski bazen Lipa; planirana je još jedna akumulacija Čaprazlije). [25], [52]

2.2.2.3. Podsliv rijeke Krke

Rijeka Krka je krška rijeka, ukupne duljine 56 km te sa slivom površine 2 427 km², od čega 142 km² obuhvaća Nacionalni park Krka. Rijeka izvire ispod sedrene barijere slapa Topolje kod Knina, a ulijeva se u Jadransko more kod Skradina. Duž svog toka Krka prima niz značajnih pritoka. Veći pritoci rijeke su Krčić, Kosovčica, Orašnica, Butišnica, Miljacka, Čikola, Goduča i Rivina Jaruga. Središnji godišnji protok Krke preko Skradinskog buka je oko 55 m³/s, a dnevni protok može varirati od 5 do 565 m³/s. [24], [50], [53]

Hidroenergetski potencijal rijeke Krke, osobito donjeg toka rijeke, prepoznat je već krajem 19. stoljeća kada je izgrađena i prva hidroelektrana na rijeci Krki. Na rijeci Krki trenutno se nalazi pet hidroelektrana: HE Golubić, MHE Krčić za koju je planirana nadogradnja čime bi se mogla svrstati u hidroelektrane srednjeg kapaciteta, HE Miljacka, HE Roški slap te HE Jaruga. U planovima je predviđena izgradnja još devet hidroelektrana na rijeci Krki. Rijeka Krka ima velik potencijal izgradnje malih hidroelektrana zbog činjenice da se na njoj nalazi velik broj starih i napuštenih mlinica koje bi se mogle prenamijeniti za energetska korištenje rijeke. [25], [54], [55]

2.2.2.4. Podsliv rijeke Zrmanje

Rijeka Zrmanja je rijeka krškog podneblja, toka duljine je 69 km koji je većim dijelom vijugavog, promjenjivog kanjonskog karaktera. Površina slivnog područja rijeke Zrmanje iznosi 907 km². Rijeka izvire u mjestu Zrmanja vrelo u Lici, podno planine Poštak na nadmorskoj visini od 335 m, a ulijeva se u Jadransko more, nedaleko Obrovca. Glavne pritoke joj pri tome čine rijeke: Krenjza, Krupa, Ričica i Otuča. Vodu prima i iz niza podzemnih izvora kao što su Čudina, Đurica, Milića, itd. [24], [50]

Iskorištavanje hidroenergetskog potencijala rijeke Zrmanje započelo je izgradnjom reverzibilne hidroelektrane (RHE) Velebit koja je smještena uz rijeku Zrmanju. RHE Velebit koristi vode šireg područja sliva rijeke Zrmanje, točnije koristi vode vodotoka Ričice, Opsenice, Otuče i Krivka na području Gračačke visoravni. [25]

3. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV REPUBLIKE HRVATSKE

3.1. Energetski sustav Hrvatske

Energetski sustav Hrvatske čine elektroenergetski, plinski, naftni, toplinski i prometni sustav. Kako je cilj diplomskog rada promotriti utjecaj hidrologije na proizvodnju električne energije iz hidroelektrana u ovom poglavlju stavljen je fokus na elektroenergetski sustav Hrvatske. U nastavku je dan prikaz kapaciteta Hrvatske za proizvodnju električne energije te su kapaciteti razvrstati prema kriteriju korištenja energenta. Razlikovani su kapaciteti koji električnu energiju proizvode iz fosilnih goriva (termoelektrane, kogeneracijska postrojenja), nuklearne energije (nuklearne elektrane) te iz obnovljivih izvora energije (vjetroelektrane, sunčeve elektrane, geotermalne elektrane, elektrane na biomasu, bioplin). [17], [56], [57]

Tablica 1 Pregled termoelektrana u Hrvatskoj [17]

Termoelektrana	Raspoloživa snaga na pragu; [MW]	Proizvedena električna energija u 2019. godini; [GWh]	Gorivo
TE Sisak	229	719,9	Loživo ulje, prirodni plin
TE – TO Zagreb	420	1 339,8	Loživo ulje, prirodni plin
TE Rijeka	303	0	Loživo ulje
TE Plomin (A + B)	105 + 210	0 + 1 630,8	Ugljen
EL – TO Zagreb	50	191,1	Prirodni plin, loživo ulje
TE – TO Osijek	89	56,2	Prirodni plin, loživo ulje, ekstralako ulje
KTE Jertovec	76	1,3	Prirodni plin, ekstralako ulje
Ostale elektrane na bioplin	51,9	383,9	Bioplin
Ostale elektrane na biomasu	75,5	477,1	Biomasa
Geotermalne elektrane	10	91,9	-
Industrijske kogeneracije	157,3	369,5	Ugljen, prirodni plin, loživo ulje, drveni otpad
Ostale kogeneracije	4,3	15,7	Prirodni plin
UKUPNO	1 781	5 277,2	-

Hrvatska zajedno sa Slovenijom dijeli nuklearnu elektranu (NE) Krško, instaliranog kapaciteta 696 MW. Vlasnički dio Hrvatske nad nuklearnom elektranom Krško iznosi 50 %, tj. Hrvatska ima na raspolaganju 348 MW instalirane snage. U 2019. godini NE Krško proizvela je ukupno 2 766,3 GWh električne energije. U bilanci električne energije proizvodnja iz NE Krško smatra se uvozom električne energije.

U Hrvatskoj je izgrađeno ukupno 23 vjetroelektrane, ukupne instalirane snage 646,3 MW na 325 vjetroagregata te se uglavnom nalaze u srednjoj Dalmaciji i njenoj unutrašnjosti Sve veći interes pokazuje se za područje sjeverne Dalmacije. U prosjeku godišnje vjetroelektrane isporučuju oko 1 500 GWh električne energije. [17], [57], [58]

Raspoloživa snaga sunčanih elektrana u Hrvatskoj iznosi 84,8 MW koje godišnje proizvedu 83,1 GWh električne energije. [17], [56], [57]

Pregled izgrađenosti hidroelektrana dan je u slijedećem poglavlju.

Koncem 2019. godine ukupna raspoloživa snaga elektrana za proizvodnju električne energije iznosila je 4 711,8 MW. Od toga najveći instalirani kapacitet nalazi se u hidroelektranama s 2 199,7 MW instalirane snage te u termoelektranama s 1 781 MW instalirane snage. Zatim slijedi 643,3 MW instalirane snage vjetroelektrana, 348 MW instalirane snage nuklearne energije te 84,8 MW instalirane snage sunčanih elektrana.

3.2. Stanje izgrađenosti hidroelektrana u Hrvatskoj

Hidroelektrane u Hrvatskoj čine 46,7 % kapaciteta za proizvodnju električne energije u našem elektroenergetskom sustavu. Ukupna nazivna snaga hidroelektrana iznosi 2 199,7 MW. Godišnja proizvodnja iz HE varira te uvelike ovisi o hidrološkim uvjetima godine. Prema podacima iz 2019. godine proizvodnja iz hidroelektrana u Hrvatskoj iznosila je 5 277,1 GWh što je 42 % od 12 760 GWh koliko je ukupno iznosila proizvodnja električne energije u Hrvatskoj. Upravljanje hidroelektranama je podijeljeno na četiri proizvodna centra (CP): Sjever, Zapad, Istok i Dubrovnik. Proizvodnja iz hidroelektrana uvelike ovisi o hidrološkim uvjetima te vlažnim i sušnim razdobljima koja se pojavljuju. [17], [25], [59]

U Hrvatskoj se danas nalazi:

- 17 velikih hidroelektrana snage više od 10 MW [25]
- 20 – tak malih hidroelektrana snage od 5 do 10 MW[25], [54], [60]
- 10 – tak mikro hidroelektrana snage manje od 5 MW.

U Tablica 2 dan je pregled velikih hidroelektrana te dio malih hidroelektrana, čija je instalirana snaga veća od 5 MW.



Slika 13 Stanje izgrađenosti hidroelektrana u Hrvatskoj [18]

Tablica 2 Popis hidroelektrana u Hrvatskoj [25]

Slivno područje	Redni broj	Naziv	Tip HE	Raspoloživa snaga; [MW]	Instalirani protok - turbinski rad; [m ³ /s]	Neto pad; [m]
HE u slivu rijeke Drave	1.	HE Varaždin	Protočna hidroelektrana	94,64	450	22
	2.	HE Čakovec	Akumulacijska hidroelektrana	77,44	500	17,5
	3.	HE Dubrava	Akumulacijska hidroelektrana	79,78	500	18
HE u slivu rijeke Kupe	4.	HE Ozalj	Protočna hidroelektrana	5,5	85	9,7
	5.	HE Gojak	Akumulacijska hidroelektrana	57	50	105
	6.	HE Zeleni Vir	Protočna hidroelektrana	1,8	4,4	50
	7.	HE Lešće	Akumulacijska hidroelektrana	42,5	60	38,15
HE u slivu rijeke Lokvarke i Ličanke	8.	HE Vinodol	Reverzibilna hidroelektrana	91,5	18,6	645,5
	9.	CHE Fužine	Reverzibilna hidroelektrana	6	9,9	49
	10.	CHE Lepenica	Reverzibilna hidroelektrana	1,1	6,2	12,22
HE na Riječini	11.	HE Rijeka	Akumulacijska hidroelektrana	36,8	21	213
HE u slivu rijeke Like i Gacke	12.	HE Senj	Protočna hidroelektrana	216	60	410
	13.	HE Sklope	Akumulacijska hidroelektrana	22,5	45	60
HE na vodama Gračanske visoravni	14.	RHE Velebit	Reverzibilna hidroelektrana	280	60	517
HE u slivu rijeke Krke	15.	HE Golubić	Protočna hidroelektrana	7,5	14	59
	16.	mHE Krčić	Protočna hidroelektrana	0,35	1	37,3
	17.	HE Miljacka	Protočna hidroelektrana	24	32,2	102
	18.	HE Jaruga	Protočna hidroelektrana	7,3	31	24,5
HE u slivu rijeke Cetine	19.	HE Peruća	Akumulacijska hidroelektrana	61,2	120	47
	20.	HE Orlovac	Reverzibilna hidroelektrana	237	70	380
	21.	HE Đale	Akumulacijska hidroelektrana	40,8	220	21
	22.	HE Zakućac	Akumulacijska hidroelektrana	576	240	250,4
	23.	HE Kraljevec	Protočna hidroelektrana	4,8	55	108,9
HE u slivu rijeke Trebišnjice	24.	HE Dubrovnik	Akumulacijska hidroelektrana	252	105	275
	25.	HE Zavrelje	Akumulacijska hidroelektrana	1,9	3	75,8

S obzirom da su u ovom diplomskom radu promatrani različiti udjeli obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu temeljem planiranih kapaciteta u *Strategiji energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu* u obzir su uzeta i razmatranja o povećanju kapaciteta hidroelektrana u Hrvatskoj. U planiranju novih kapaciteta hidroelektrana u Hrvatskoj najdalje se otišlo s planiranjem Hidroenergetskog sustava (HES) Senj. Stoga je u Tablica 3 dan pregled predviđenih promjena u HES Senj. [61]–[63]

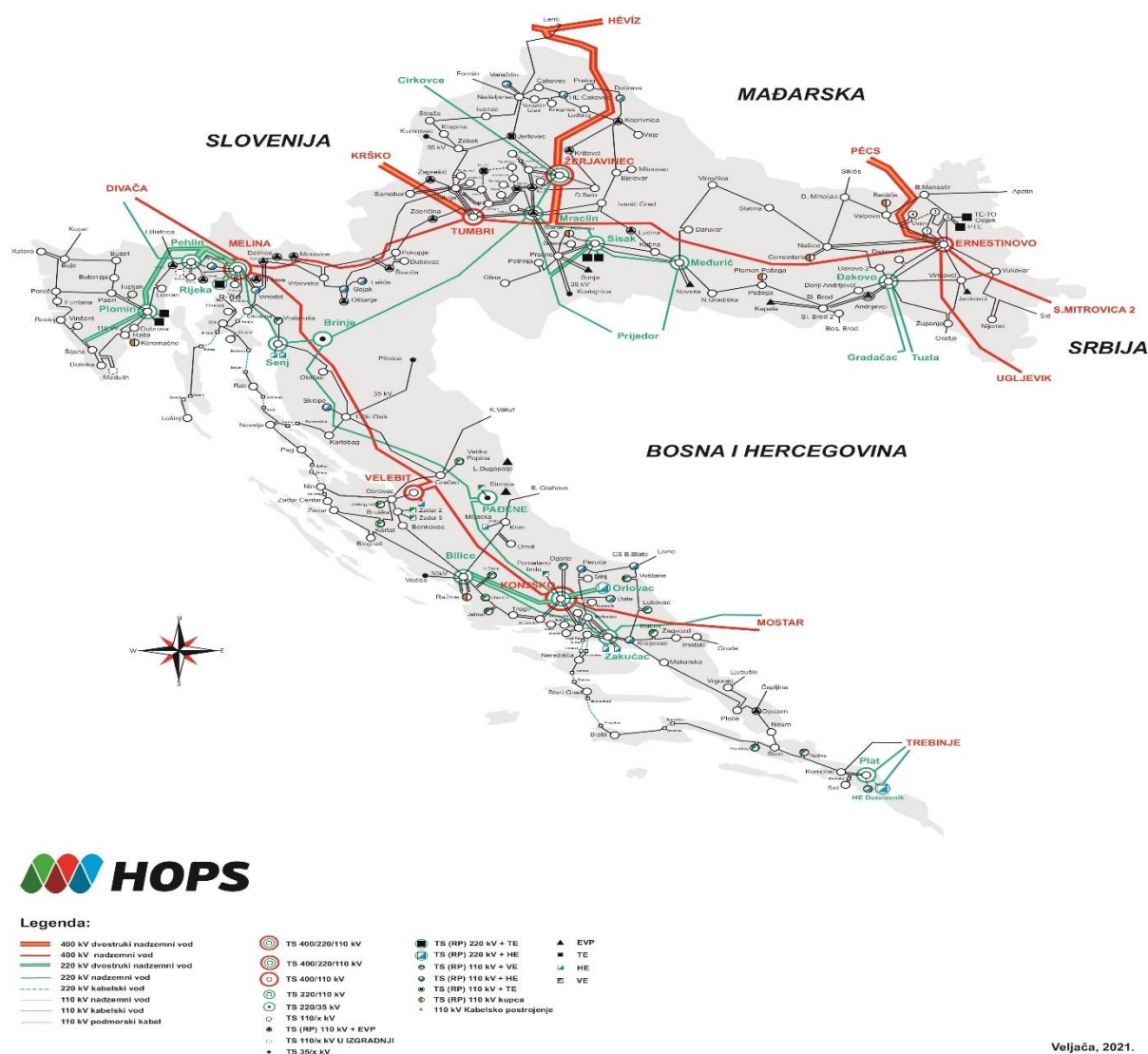
Tablica 3 Pregled planiranog proširenja HES Senj [61]–[63]

Slivno područje	Redni broj	Naziv	Tip HE	Raspoloživa snaga; [MW]	Instalirani protok - turbinski rad; [m ³ /s]	Neto pad; [m]
HE u slivu rijeke Like i Gacke	1.	HE Senj	Protočna hidroelektrana	216	60	410
	2.	HE Senj 2	Protočna hidroelektrana	342	90	412
	3.	HE Sklope	Akumulacijska hidroelektrana	27,32	50	60
	4.	HE Kosinj	Akumulacijska hidroelektrana	33,5	50	48

Rekonstrukcijom i nadogradnjom HES Senj ukupni kapacitete hidroelektrana povećava se za novih 375, 5 MW te bi se godišnja proizvodnja električne energije iz HES Senj povećala s postojećih 1 061 GWh na 1 334 GWh električne energije godišnje, tj. za 273 GWh godišnje (za 20 %). [61]–[63]

3.3. Prijenosna mreža električne energije Hrvatske

Hrvatski elektroenergetski sustav (EES) čine različiti proizvodni objekti i postrojenja, prijenosna i distribucijska mreža te potrošači/kupci električne energije. Usluge koje EES nudi su vođenje EES – a, održavanja frekvencije i napona te stabilnosti i fleksibilnosti EES – a. Hrvatski EES član je ENTSO – E udruženja, što podrazumijeva povezanost s EES – ovima susjednih država i ostalim članicama ENTSO – E udruženja. Takva povezanost osigurava kvalitetnu i sigurnu opskrbu kupaca/potrošača električne energije u Hrvatskoj. Potrošači električne energije u Hrvatskoj na raspolaganju imaju opskrbu električnom energijom iz elektrana na području Hrvatske, električnu energiju iz elektrana koje su izgrađene u susjednim državama za potrebe Hrvatske te električnu energiju iz inozemstva. [58]



Slika 14 Elektroenergetska mreža Republike Hrvatske [58]

Električna energija u Hrvatskoj prenosi se prijenosnom i distribucijskom mrežom naponskih razina 400, 220 i 110 kV te 110, 35(30)/10(20) 10(20)/0,4 kV. U Tablica 4 i Tablica 5 nalazi pregled stanja EES – a s obzirom na transformatorske stanice, rasklopna postrojenja te zračne vodove i kablove. [58]

Tablica 4 Stanje prijenosne mreže EES - a (5. veljače 2020. godine) [58]

Transformatorske stanice	
Naponska razina	Broj
400 kV	6
220 kV	15
110 kV	162
Ukupno	183
Vodovi; [km]	
Napon	Ukupno
400 kV	1 246,4
220 kV	1 331,1
110 kV	5 180,7
Srednji napon	36,0
Ukupno	7 794,1

Tablica 5 Stanje distribucijske mreže EES -a (5. veljače 2020. godine) [58]

Transformatorske stanice	
Naponska razina	Broj
110 kV	142
35(30)/10(20) kV	301
10(20)/0,4 kV	26 124
Ukupno	26 567
Vodovi; [km]	
Napon	Ukupno
110 kV	10
35(30) kV	4 518
20,10 kV	10 465, 27 160
0,4 kV	62 083
Priključci	35 840
Ukupno	140 076

Hrvatski EES svojom veličinom spada u manje EES – ove Europe, no, s obzirom na svoj geografski položaj, ima važnu tranzitnu ulogu u prijenosu električne energije iz Sjeverne i Zapadne Europe na Jug i Jugoistok Europe. Hrvatski EES regulira Hrvatski operater prijenosnog sustava (HOPS), te zajedno sa slovenskim EES – om i EES – om Bosne i Hercegovine čini upravljački blok SLO – HR – BIH unutar ENTSO – E udruženja. [58]

3.4. Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu

Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine, s pogledom na 2050. godinu vizija je postizanja niskougljične energije, pokretanja energetske tranzicije te prijelaza u novo razdoblje energetske politike kojom se želi osigurati pristupačna, sigurna te pouzdana i kvalitetna opskrba energijom.

Strategija predstavlja širok spektar mjera, inicijativa te ideja za energetske politiku, njima se želi ojačati sigurnost, opskrba energijom, smanjiti gubici energije i povećati energetska učinkovitost, smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima, povećati domaća proizvodnja i korištenje obnovljivih izvora energije.

Strategijom se namjerava potaknuti dodatni gospodarski razvoj kroz poticanje novih istraživanja, uvođenja inovacija i demonstracijom novih rješenja i tehnologija te integracijom stanovništva, obrta i tvrtki kao aktivnih sudionika na globalnom tržištu energetskih rješenja.

Strategija je usklađena sa svim svjetskim i europskim energetskim planovima o postizanju ugljične neutralnosti te poštuje smjernice i ciljeve koji su postavljeni *Zelenom knjigom*, *Bijelom knjigom* te *Pariškim sporazumom*.

U *Strategiji* su razmatrana tri scenarija:

- Scenarij 0 (S0) – Scenarij razvoja uz primjenu postojećih mjera
- Scenarij 1 (S1) – Scenarij ubrzane energetske tranzicije
- Scenarij 2 (S2) – Scenarij umjerene energetske tranzicije.

Scenarij 0 bi predstavljao kontinuitet sadašnje politike te primjena postojećih mjera u promjenama energetskog sektora, tj. to je scenarij *bussines as usual*. Scenarij 1 postavlja visoke ciljeve i očekivanja pred energetske sektor gdje bi bili osmišljeni novi načini poticanja i ulaganja u energetske sektor. Ovim scenarijom predviđa se veći udio obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije, veći udio električnih vozila te visok postotak obnove u zgradarstvu. Scenarij 2 predstavlja i ima slične ciljeve kao scenarij 1, no s nešto manjim očekivanjima. Uspoređujući opisane scenarije prema kriteriju investicijske zahtjevnosti, scenarij 1 je najzahtjevniji, zatim slijedi scenarij 2 te scenarij 0. [7]

U Tablica 6 dane su glavne odrednice svih scenarija te njihova usporedba.

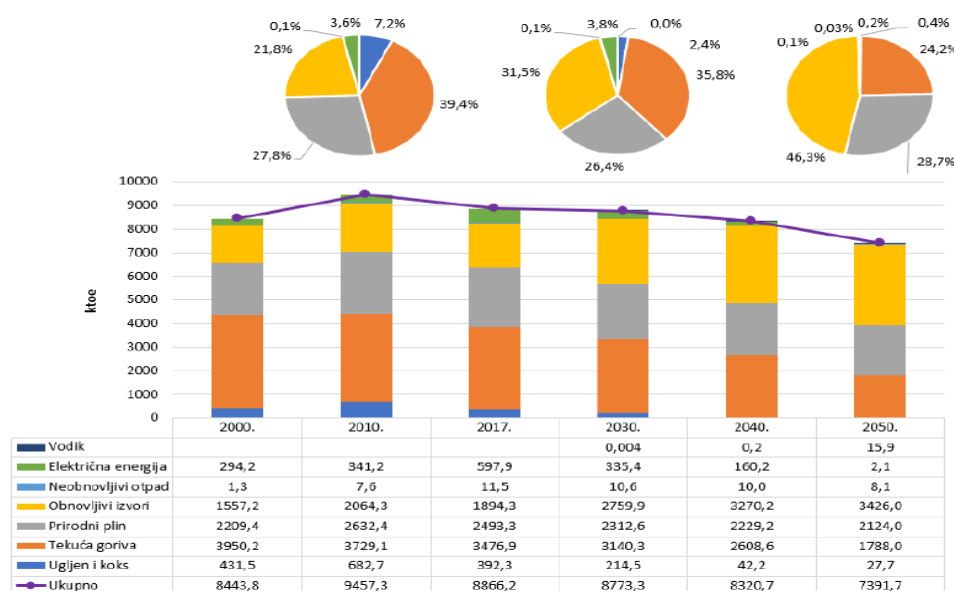
Tablica 6 Pregled i usporedba glavnih odrednica razmatranih scenarija [7]

	Početno stanje; [%]	S0; [%]		S1; [%]		S2; [%]	
	2016./17.	do 2030.	do 2050.	do 2030.	do 2050.	do 2030.	do 2050.
Očekivano smanjenje emisije stakleničkih plinova u odnosu na razinu emisije iz 1990. godine	21,8	32,8	49,3	37,5	74,44	35,4	64,3
Promjena neposredne potrošnje energije u odnosu na potrošnju iz 2005. godine	-7	7,3	-3,8	2,6	-28,6	8,1	-15
Energetska obnova fonda zgrada	0,2	0,2	0,2	3	3	1,6	1,6
Udio električnih i hibridnih vozila	1	2,5	30	4,5	85	3,5	65
Udio OIE u bruto neposrednoj potrošnji energije	27,3	35,7	45,5	36,7	65,6	36,6	53,2
Udio OIE u proizvodnji energije	45	60	82	66	88	61	83

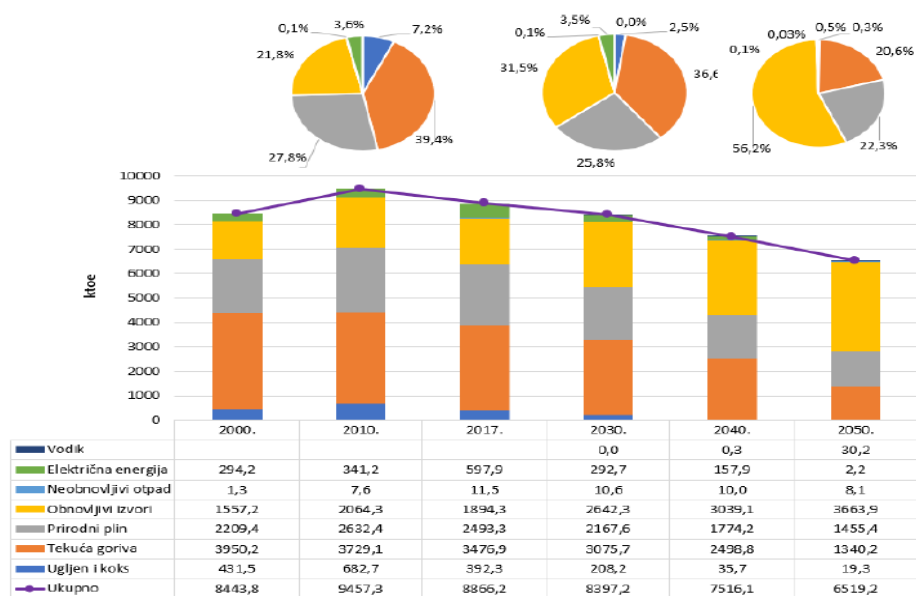
S obzirom na tematiku diplomskog rada, izložen je dio energetske strategije koja se odnosi energetske sustav, točnije proizvodnju električne energije. Dan je pregled navedenih scenarija te očekivanja koje oni stavljaju pred EES.

3.4.1. Ukupna potrošnja energije

Ukupna potrošnja energije je zbroj proizvedene primarne energije, ukupnog uvoza primarne energije te transformirane energije koja se umanjuje za ukupni iznos izvoza primarne energije i izvoza transformirane energije. Na Slika 15 i Slika 16 prikazan je očekivani trend kretanja ukupne potrošene energije.



Slika 15 Ukupna potrošnja energije prema S2 [7]



Slika 16 Ukupna potrošnja energije prema S1 [7]

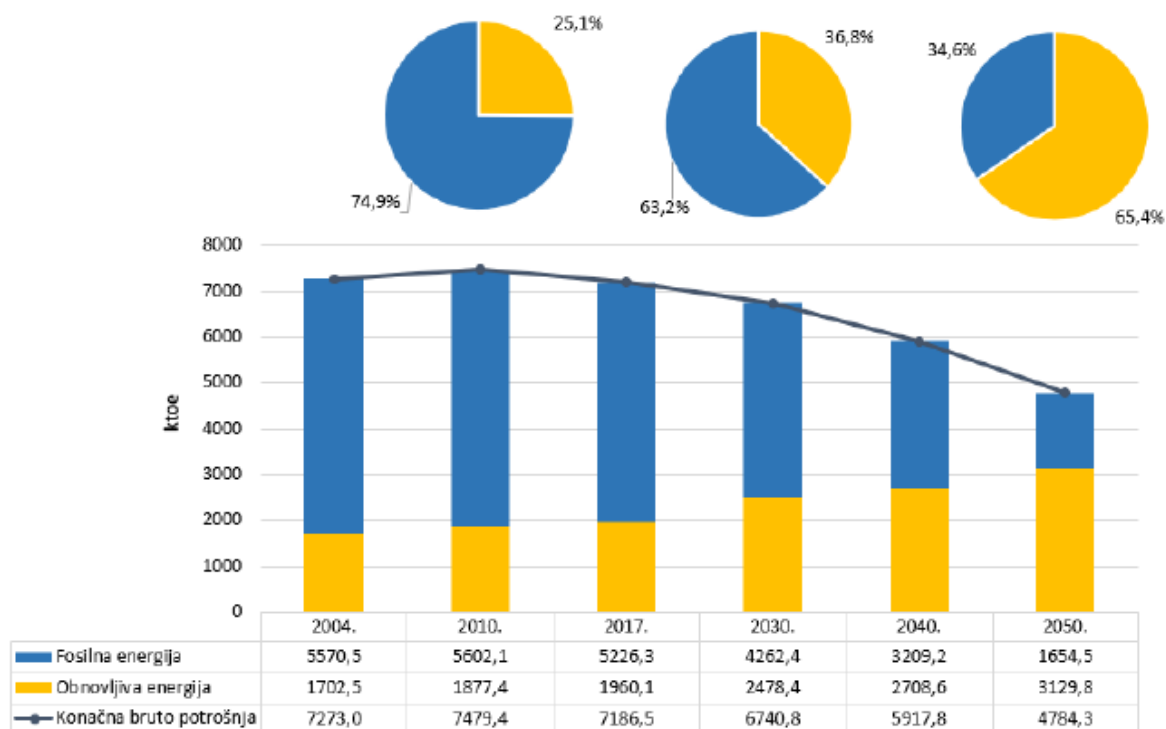
U analiziranim scenarijima ukupna potrošnja energije smanjuje se tijekom cijelog razdoblja. Prema scenariju 1 ukupna potrošnja u 2030. godini manja je za 5 %, a u

2050. godini za 26 %. U scenariju 2 ukupna potrošnja u 2030. godini manja je za 1 %, a u 2050. godini za 17 %.

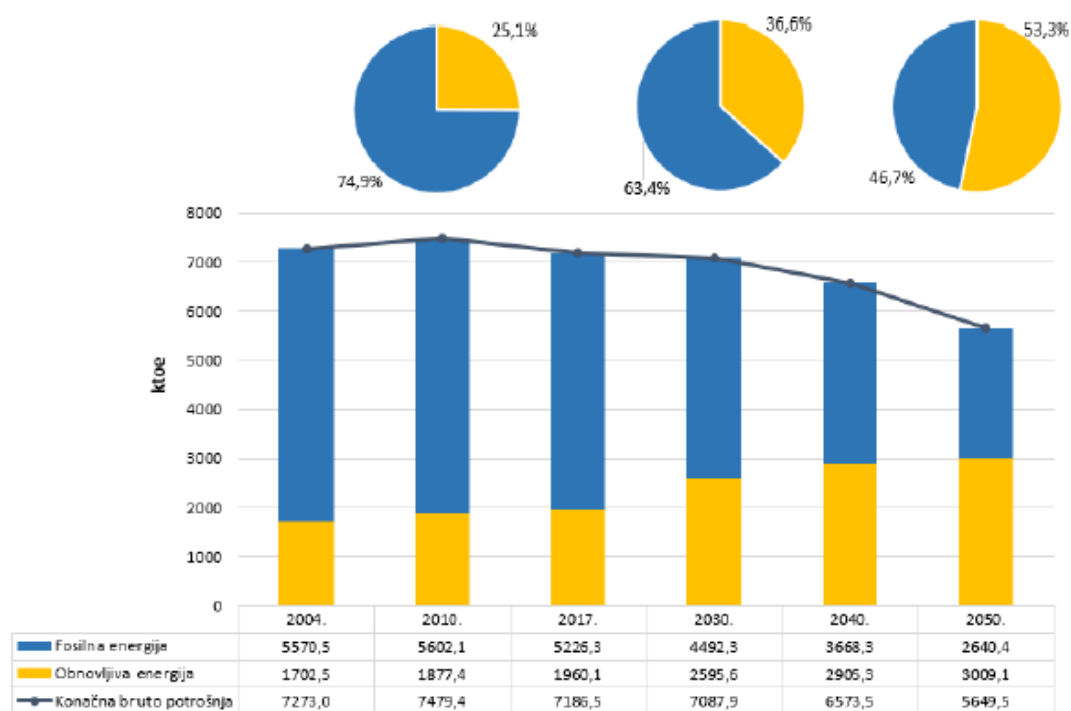
Referentna godina, korištena za usporedbu, je 2017. godina. [7]

3.4.2. Bruto neposredna potrošnja energije

Bruto neposredna potrošnja je količina energije isporučena za energetske potrebe krajnjih kupaca u industriji, prijevozu, kućanstvima, uslugama, uključujući javne usluge, poljoprivredu, šumarstvo, ribarstvo, uključujući potrošnju energije u energetskom sektoru za potrebe proizvodnje električne energije i toplinske energije, kao i gubitke električne i toplinske energije u prijenosu i distribuciji energije.



Slika 17 Bruto neposredna potrošnja prema scenariju S1 [7]



Slika 18 Bruto neposredna potrošnja prema scenariju S2 [7]

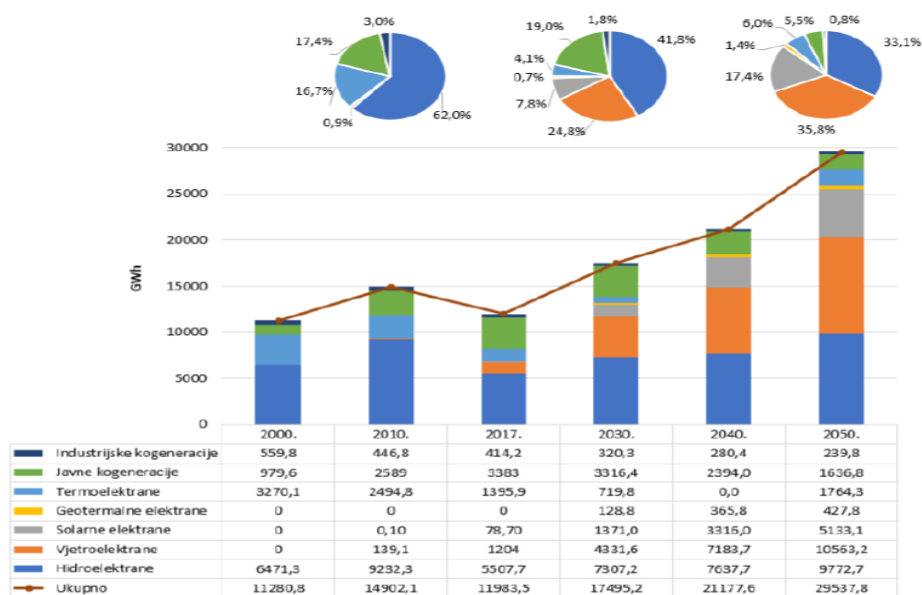
U scenariju 2, bruto neposredna potrošnja, do 2030. godine stagnira te se zatim do 2050. godine smanjuje za 20 %. Udio obnovljivih izvora energije raste na 37 % do 2030. godine, a do 2050. na 53 %.

U scenariju 1 smanjuje se za 6 % do 2030. godine, a do 2050. godine, bruto neposredna potrošnja, smanjuje se za 29 %. Udio obnovljivih izvora energije raste na 37 % do 2030. godine, a do 2050. na 65,4 %.

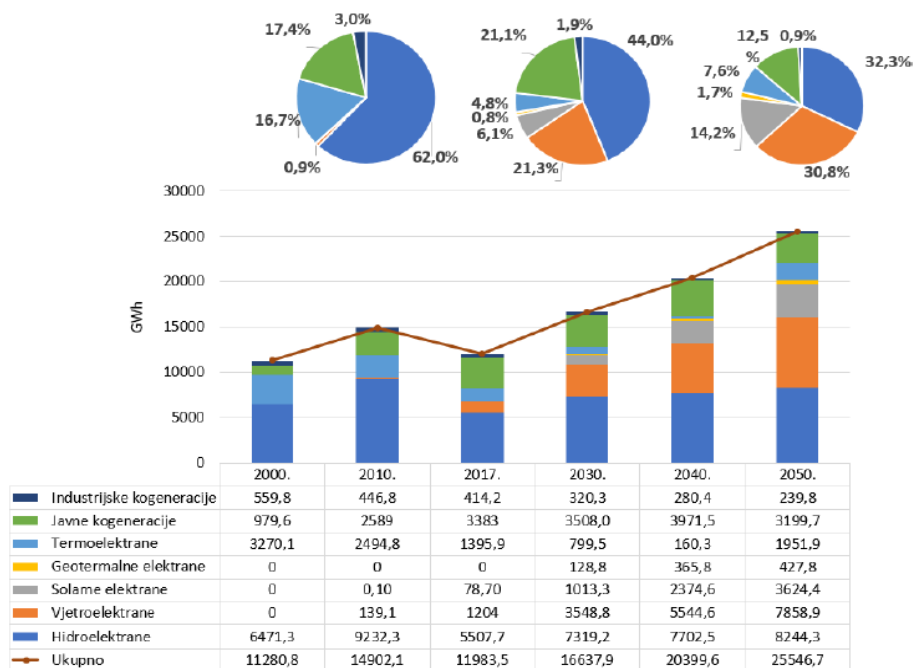
Referentna godina, korištena za usporedbu, je 2017. godina. [7]

3.4.3. *Proizvodnja električne energije*

U oba scenarija očekuje se promjena u strukturi proizvodnje električne energije. Obnovljivi izvori energije preuzimaju primat u proizvodnji električne energije te istiskuju proizvodnju iz termoelektranama. U scenarijima dana je pretpostavka da bi se do kraja 2050. sva potrebna količina električne energije mogla proizvesti iz domaćih elektrana, ali ipak uz mogućnost razmjene s državama u okruženju.



Slika 19 Proizvodnja električne energije prema scenariju S1 [7]



Slika 20 Proizvodnja električne energije prema scenariju S2 [7]

U scenariju 2, proizvodnja iz hidroelektrane opada s 46 %, na 44 % u 2030. godini i na 32,3 % u 2050. godini. Iako su planirani novi kapaciteti hidroelektrana te su uzeti u obzir u proračunu, udio u proizvodnji bi se smanjio zbog povećanja kapaciteta drugih obnovljivih izvora energije, vjetroelektrana i solarnih elektrana. Također, u obzir je uzeta i mogućnost pojave hidrološki vlažne i sušne godine. Ukupna proizvodnja iz termoelektrana s postojećih 43 % pada na 28 % do 2030. te na 21 % do 2050. godine. Važno je naglasiti kako nije planirana izgradnja novih termoenergetskih postrojenja. Proizvodnja iz vjetroelektrana i solarnih elektrana povećava se s 1,3 TWh na 4,6 TWh u 2030 i na 11,5 TWh u 2050. godini. Udio u proizvodnji s 10,7 % raste na 27,4 % u 2030. godini te na 44,9 % u 2050. godini.

U scenariju 1, proizvodnja iz hidroelektrane opada s 46 %, na 42 % u 2030. godini te na 33 %. Ukupna proizvodnja iz termoelektrana s postojećih 43 % pada na 25 % do 2030. te na 12 % do 2050. godine. Proizvodnja iz vjetroelektrana i solarnih elektrana raste s 1,3 TWh na 5,7 TWh u 2030. i na 15,7 TWh u 2050. godini. Udio u proizvodnji s 10,7 % raste na 32,6 % u 2030. godini te na 53,1 % u 2050. godini.

Referentna godina, korištena za usporedbu, je 2017. godina. [7]

4. OPIS MODELA

Da bi valjano analizirao utjecaj hidrologije na rad hidroelektrana s većim udjelom obnovljivih izvora energije potrebno je kreirati model po kojem se analiza provodi. Model je podijeljen na četiri dijela. Prvi dio se odnosi se na LISFLOOD model iz kojeg se dobivaju hidrološki podaci na područjima hidroelektrana. Kako bi procijenili valjanost LISFLOOD modela slijedeći korak se sastojati od usporedbe podataka dobivenih u LISFLOOD modelu te podataka prikupljenih od strane hidrološke službe Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) na mjernim mjestima riječnih slivova. Nadalje, podaci su evaluirani te su odabrani ulazni podaci za Dispa – SET model. Dispa – SET model sastoji se od dva dijela Dispa – SET Medium – Term Hydrothermal Coordination (Dispa – SET MTHC) i Dispa – SET Unit Commitment and Dispatch (Dispa – SET UCD). Dispa – SET MTHC model koristi ulazne podatke LISFLOOD – a te izračunava podatke o razini akumulacija te proizvodnji električne energije iz hidroelektrana. Proračun Dispa – SET MTHC modela vrši se na dnevnoj razini. Podaci iz Dispa – SET MTHC modela su ulazni podatci za Dispa – SET UCD. Dispa – SET UCD model daje podatke o načinu vođenja elektrana, tj. raspored rada elektrana, konačne podatke o korištenim vodenim resursima te ekonomske podatke.

U ovom diplomskom radu korišten je Dispa – SET MTHC model.

4.1. LISFLOOD

LISFLOOD model je hidrološki model koji omogućuje simuliranje hidroloških procesa koji se pojavljuju na područjima slivova. LISFLOOD model razvijen je tijekom projekta Opasnost od prirodnih nepogoda (eng. Natural Hazards Project) koji je vodila grupa znanstvenika Zajedničkog istraživačkog centra Europske Komisije (eng. Joint Research Centre, JRC). Tijekom razvijanja ovog modela osnovna nit vodilja bila je napraviti model koji se može koristiti na velikom međunarodnom području te se može koristiti za različite namjene poput predviđanja poplava, procjene utjecaja regulacije vodnih režima rijeka, procjene utjecaja korištenja zemljišta za hidrološke uvjete te procjene utjecaja klimatskih promjena na hidrološke uvjete. [64]

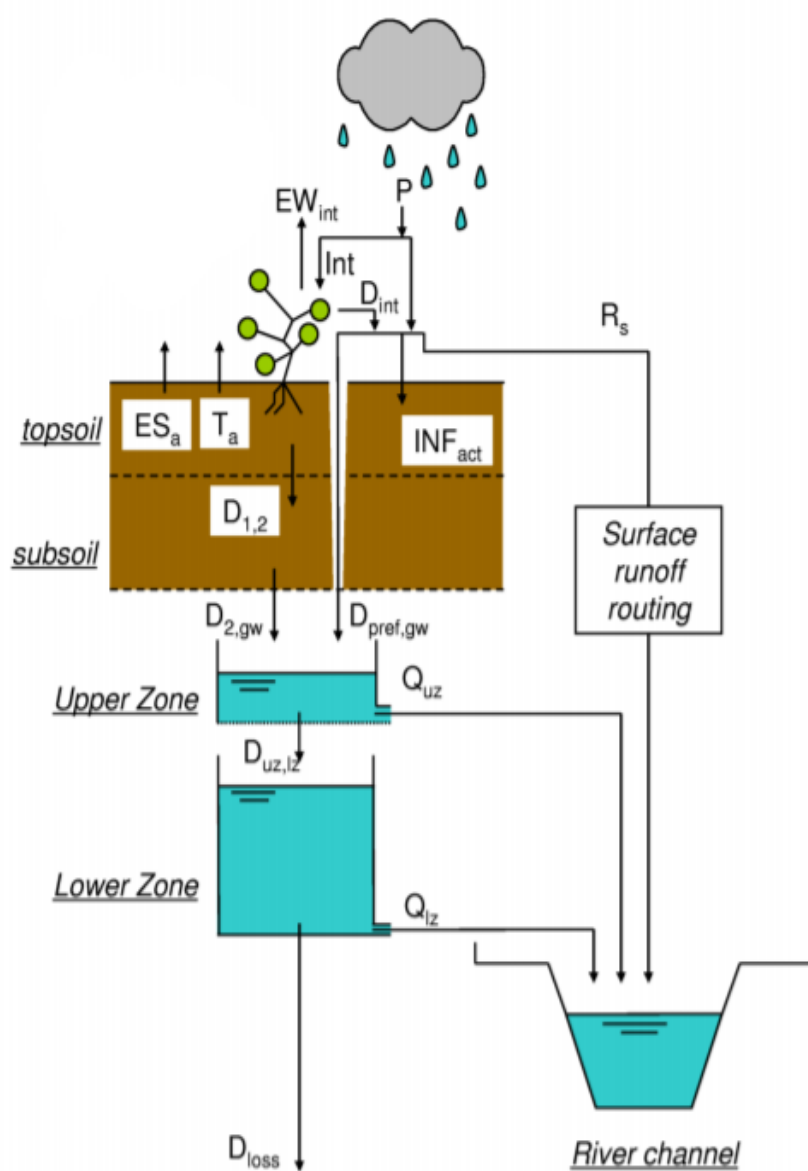
LISFLOOD model može se koristiti na različitim prostornim i vremenskim skalama. Prostorni dio modela zasniva se na korištenju mreže te se stoga mogu promatrati područja različitih površina. Korištenjem ćelija mreže veličine:

-
- do 100 m opisuju se srednje velika slivna područja
 - do 5000 m opisuju se velika slivna područja poput Europe
 - do 10 km opisuju se vrlo velika slivna područja te je time moguće promatrati globalne hidrološke uvjete.

Na vremenskoj skali model se može koristiti za promatranje hidroloških uvjeta u duljem vremenskom periodu te se tada koriste dani kao vremenski korak ili za promatranje hidroloških uvjeta na kraćem vremenskom periodu kada se koristi satni ili minutni proračun. Korištenjem kraćeg vremenskog perioda može se zasebno promatrati poplavne procese. Model omogućuje korištenje izlaznih podataka dulje vremenske skale za model s vremenski kraćim periodom, takav princip koristi se za simulaciju uvjeta pri kojima nastaju poplave. Rezultat proračuna LISFLOOD modela je varijabla protoka, no korisnik modela ima potpunu slobodu prilikom ispisa izlaznih podataka te može izlazne podatke ispisati u obliku brzine toka ili varijabli poput vlažnosti tla i sl. [64]

Na Sliku 21 prikazana je struktura LISFLOOD modela. Model se prema tome može podijeliti na:

- podmodel dvoslojnog tla za održavanja hidrološke ravnoteže sustava
- podmodel za simuliranje površinskih i podzemnih tokova vode
- podmodel usmjeravanja površinskih tokova do najbližih riječnih tokova
- podmodel usmjeravanja riječnih tokova (nije prikazan na Sliku 21).



Slika 21 Pregled LISFLOOD modela [64]

Procesi koji se simuliraju u modelu su topljenje snijega, infiltracija, evaporacija, biljno korištenje vode, površinsko otjecanje, poniranje voda, promjena vlage različitih slojeva tla, tokove površinskih i podzemnih voda, tok rijeka, itd. [64]

4.2. Podatci Državnog hidrometeorološkog zavoda

4.2.1. Dostupni podaci DHMZ – a

U radu su korišteni mjerni podaci mreže mjernih postaja (MP) ustupljeni od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Napravljena je analiza mreže mjernih postaja te su se slivnim područjima hidroelektrana (HE) dodijele pripadajuće mjerne postaje. [65]

U Tablica 7 dan je pregled slivnih područja HE s pripadajućim mjernim postajama te ustupljenim podacima DHMZ – a.

Tablica 7 Pregled slivnih područja s mjernim postajama [18], [25]

Naziv HE	Mjerne postaje slivnih područja HE	Dostupnost podataka
HE Varaždin	-	-
HE Čakovec	Varaždin, 5066 (izlaz odvodnog kanala)	-
HE Dubrava	Donja Dubrava, 5115	+
HE Ozalj	Kamanje, 4024	+
HE Gojak	Turkovići (Gornja Dobra), 4088	+
HE Zeleni Vir	-	-
HE Lešće	-	-
HE Vinodol	-	-
CHE Fužine	-	-
CHE Lepenica	-	-
HE Rijeka	Martinovo selo uzvodno, 6021; Drastin, 6095	+
HE Senj	Brlog, 8010; Čovići, 8016	+
HE Sklope	Budak, 8012; Šumečica, 8502 (visina akumulacije)	+/-
RHE Velebit	Štikada jezero, 8083; Gračac 2, 8146, Josetin most, br. 8087; Gračac grad, 7302.	-
HE Golubić	Dragaš, 7186; Klinac, 7302	-
MHE Krčić	-	-
HE Miljacka	Marjanovići, 7195; Klinac, 7302	-
HE Jaruga	Skradinski Buk gornji, 7095	+
HE Peruća	Vinalić, 7190; Šilovka, 7099	-
HE Orlovac	Orlovac, 7137	-
HE Đale	Gale, 7415; Ruda 1, 7171; Vedrine, 7389	+/-
HE Zakučac	-	-
HE Kraljevec	Blato na Cetini, 7003; Tisne Stine 1, 7232; Pavića most, 7223	+/-
HE Dubrovnik	-	-
HE Zavrle	-	-

Iz Tablica 7 je vidljivo da se pojedinim slivnim područjima nije moguće dodijeliti odgovarajuće mjerne postaje, razloga za to može biti više. Primjerice: pojedina slivna područja hidroelektrana nemaju mjerene postaje s kojima bi ih se moglo opisati, npr. HE Varaždin, HE Čakovec, neka slivna područja, poput slivnog područje na kojem se nalazi RHE Vinodol ili RHE Velebit, imaju složene izvedbe te opis takvih slivova nije moguć pomoću postojećih mjernih postaja, tj. nema dostatnih mjernih postaja za opis. Na nekim slivnim područjima nema dostupnih podataka o protocima jer se mjeri samo visina vodostaja kao što je slučaj kod HE Sklope te za neke mjerne postaje nisu ustupljeni podaci zbog pravnih obaveza prema drugoj strani. Primjerice, pojedine mjerne postaje su u vlasništvu Hrvatske elektroprivrede te DHMZ ih samo održava i bilježi podatke te su ti podaci nedostupni.

U Tablica 7, u stupcu Dostupni podaci, plusom (+) su označena ona mjerna mjesta za koja su dostupni mjerni podaci, minusom (-) su označena mjerna mjesta za koja nisu dostupni mjerni podaci te plusom/minusom (+/-) mjerna mjesta za koja su djelomično dostupni podaci. Dostupni podaci su razdoblja od 1990. do 2020. godine te su zapisivani u dva oblika, na dnevnoj razini (stariji podaci do 2000. te godine) te satnoj razini (noviji podaci od 2000. te godine).

U nastavku je provedena usporedba dostupnih mjernih podataka DHMZ -a s podacima iz LISFLOOD – a te su podaci LISFLOOD – a evaluirani.

4.2.2. Usporedba dostupnih podataka o protocima DHMZ – a i LISFLOOD – a

Usporedba dostupnih podataka o protocima provedena je u Excel – programu, metoda usporedbe opisana je u daljnjem tekstu. Usporedbu podataka provedena je u vremenskom razdoblju od 1990. – te do 2016. – te godine, uz pojedine iznimke koje su navedene u Tablica 8. Budući da su podaci DHMZ – a od 2000. – te godine satnog koraka potrebno ih je svesti na prosječnu dnevnu razinu kako bi bili usporedivi s podacima LISFLOOD – a. Zatim je određena razliku između podataka DHMZ – a i LISFLOOD – a na dnevnoj razini te je ta razlika dijeljena s maksimalnom vrijednošću protoka DHMZ – a ili LISFLOOD – a kako bi se dobila postotna razlika koja se može uspoređivati s dopuštenim granicama razlikovanja. Kao dopuštena granica razlikovanja odabrana je vrijednost od 10 % kako bi podatak bio valjan. Kao posljednji korak svim mjernim podacima dodijeljena je vrijednost u ovisnosti o dobivenoj razlici. Vrijednost koju mjerni podatak može poprimiti jest:

- jedan (1) – podaci koji se postotno razlikuju više od 10 %
- nula (0) – podaci koji se postotno razlikuju manje od 10 %.

U Tablica 8 prikazana je usporedba podataka DHMZ – a i LISFLOOD – a.

Tablica 8 Usporedba podataka DHMZ - a i LISFLOOD - a

Naziv mjerne postaje	Ukupan broj podataka za usporedbu	Broj mjernih podataka gdje je postotna razlika u podacima veća od 10 %		Broj valjanih mjerenja	
MP Donja Dubrava	9 862	7 962	81%	1 900	19%
MP Kamanje	9 862	8 363	85%	1 499	15%
MP Turkovići	9 862	9 861	100%	1	0%
MP Martinovo selo *	2 192	2 069	94%	123	6%
MP Drastin	9 862	9 348	95%	514	5%
MP Čovići **	8 036	8 027	100%	9	0%
MP Skradinski Buk	9 862	7 808	79%	2 054	21%
MP Ruda 1 + MP Vedrine + MP Ribnjak ***	1 461	1 457	100%	4	0%
MP Blato na Cetini + MP Tisne Stine	9 862	9 851	100%	11	0%
Napomena: Za MP sa *, **, *** mjerni podaci bili su dostupni redom od 2011. do 2016., 1995. do 2016. te od 2013. do 2016.					

Prema Tablica 8 podaci DHMZ – a i LISFLOOD – a znatno se razlikuju te je vrlo malo podataka o protocima koji su unutar dopuštene granice razlikovanja od 10 %. Najbliži podaci o protocima su između DHMZ podataka MP Skradinski Buk te podataka LISFLOOD – a za HE Jaruga, gdje se 2 054 mjernih podataka nalazi u dopuštenim granicama razlikovanja, no ako se uzme u obzir da je ukupan broj podataka 9 862 zaključeno je da ni podaci MP Skradinski Buk nisu zadovoljavajući. Razloga za ovakve rezultate usporedbe više je te su neki od njih već i navedeni. Kao najveća poteškoća prilikom opisivanja slivova HE pokazuje se nedostatak mjernih postaja na područjima tih slivova.

Usporedbom nije donesen konačan zaključak o valjanosti LISFLOOD podataka te bi se usporedba trebala provesti na još većem uzorku podataka mjernih postaja DHMZ – a uz detaljnije opisivanje slivnih područja HE mjernim postajama te uz pristup podacima mjernih postaja koji su nedostupni. Iz tih razloga u ovom diplomskom radu korišteni su podaci LISFLOOD – a. Činjenica koja ide tome u prilog jest da su podaci LISFLOOD – a jedini cjelovito dostupni podaci te su do sad dali valjane rezultate u Dispa – SET MTHC modelu. [66]

4.3. Dispa – SET Medium – Term Hydrothermal Coordination (Dispa – SET MTHC)

Dispa – SET MTHC model omogućuje planiranje rada hidroelektrana te rada termoelektrana minimizirajući troškove sustava proizvodnje u promatranom vremenskom razdoblju. Promatrano vremensko razdoblje može biti od godine do nekoliko godina s dnevnim, tjednim ili mjesečnim vremenskim korakom. U Dispa – SET MTHC modelu dana je veća pozornost hidroelektranama te se njih može detaljnije opisati za razliku od drugih elektrana pokretanih drugim gorivima. Elektrane poput termoelektrana, vjetroelektrana, sunčevih elektrana opisane su samo kapacitetom, gorivom te državom kojom pripadaju. Rezultat Dispa – SET MTHC modela je proizvodnja hidroelektrana te razine akumulacija. Dispa – SET MTHC model može se opisati kao nelinearni i nekonveksni problem. [67]

Dispa – SET MTHC model može se rješavati pomoću na dva pristupa:

1. Deterministički pristup – ovakav pristup pretpostavlja fiksnu vrijednost ulaznih protoka i model se može opisati pomoću linearnog, nelinearnog ili mješovitog – cjelobrojnog linearnog programiranja (eng. Mixed – integer linear programming), što ovisi o pretpostavci o tehničkim podacima hidroelektrana i termoelektrana. Deterministički pristup koristan je kad se koriste duža vremenska razdoblja simulacije.

2. Stohastički pristup – ovaj pristup je korisniji ako se koristi u stvarnoj proizvodnji na dnevnoj razini, razlog tomu je da promjenjivost različitih varijabli (hidroloških uvjeta, npr. ulaznog protoka, razinu akumulacije) pokazati će promjenu i u proizvodnji hidroelektrane.

U ovom diplomskom radu korišten je deterministički pristup i MTHC model opisan je kao model linearnog programiranja s ograničenjima. Model je napisan u GAMS – u. [67], [68]

U Tablica 9, Tablica 10, Tablica 11 dan je pregled početnih podataka, varijabli te parametara (konstanti) koje je potrebno definirati za Dispa – SET MTHC model. [69]

Tablica 9 Pregled početnih podataka [69]

Podaci	Opis
p	Vremenski period
ut	Termoelektrane
ur	Elektrane obnovljivih izvora energije
uh	Akumulacijske hidroelektrane
up	Reverzibilne hidroelektrane
l	Prijenosna mreža sa susjednim državama
n	Države
t	Tehnologije prema korištenom energentu

Tablica 10 Pregled varijabli [69]

Varijable	Mjerna jedinica	Opis
G (p, u)	GWh	Energija proizvedena u periodu p iz elektrane u
PUMP (p, u)	GWh	Energija vode pohranjene u periodu p u akumulaciji elektrane u
RES (p, u)	Mm ³	Voda pohranjena u periodu p u akumulaciji elektrane u
DIS (p, u)	m ³ /s	Potrošnja vode u periodu p u elektrane u
CH	m ³ /s	Protok punjenja akumulacije u periodu p u elektrani u
SPILL (p, u)	m ³ /s	Gubitak vode u periodu p elektrane u
UPSTREAM (p, u)	m ³ /s	Ulazni protok iz uzvodne hidroelektrane u periodu p za elektranu u
FLOW (p, l)	GWh	Prenošena energija u periodu p mrežom l
CURT (p, n)	GWh	Iskorištena energija vode u periodu p u državi n
LOSTLOAD (p, n)	GWh	Nezadovoljena potražnja u periodu p u državi n

Tablica 11 Pregled parametara (konstanti) [69]

Parametri (konsante)	Mjerna jedinica	Opis
dt	h	Duljina perioda
Gravitty	m/s ²	Gravitacijska konstanta
Density	kg/m ³	Gustoća vode
Factor 1	Mm ³ /(m ³ /s)	Pretvorbeni faktor iz m ³ /s to Mm ³
Factor 2	GWh/((m ³ /s)s)	Pretvorbeni faktor iz m ³ /s u GWh
Technology (u,T)	/	Korištena tehnologija
Demand (p, n)	GWh	Potražnja za električnom energijom za državu u periodu p
Duration (n, t)	Day	Minimalan broj dana u kojem tehnologija bi trebala proizvoditi da bi bila u statistici
Location (u, n)	/	Lokacija postrojenja
Pmin (u)	GW	Minimalna snaga elektrane pri kojoj može raditi
Pmax (u)	GW	Instalirani kapacitet elektrane
VarCost (u)	k€/GWh	Varijabilni troškovi proizvodnje elektrane
Stmin (u)	Mm ³	Minimalni volumen vode u spremniku akumulacije
Stmax (u)	Mm ³	Maksimalni volumen vode u spremniku akumulacije
Stinit (u)	Mm ³	Volumen vode spremnika akumulacije u početnom trenutku
Eta_pump (u)	%	Iskoristivost pumpe
Eta_turb (u)	%	Iskoristivost turbine
Delay (u, uu)	Day	Vrijeme uključanja elektrane u proizvodnju električne energije
NominalHead (u)	M	Nominalna visina dobave hidroelektrane
Resources (u)	m ³ /s	Ulazni protok vode
Evaporation (u)	m ³ /s	Gubitak zbog isparavanja iz akumulacije
Profiles (u)	/	Faktor kapaciteta solarnih i vjetroelektrana
Topology (u)	/	Kaskadni sustavi hidroelektrana
Spillage_max (u)	m ³ /s	Dozvoljeno izlivanje iz akumulacije
Incidence_matrix (u)	/	Matrica povezanosti prijenosnog sustava s državu u okruženju
LineCapacity (u)	GW	Kapacitet prijenosne mreže
DemandW (u)	m ³ /s	Potražnja za vodom izvan energetskog sektora
Eco_flow	m ³ /s	Protok biološkog minimuma
Availability (u)	%	Raspoloživost postrojenja

Funkcija cilja određuje ukupnu cijenu proizvodnje električne energije tijekom perioda simulacije. Funkcija cilja sadrži varijabilne troškove proizvodnje električne energije za sve elektrane, pumpnog režima reverzibilnih hidroelektrana, istjecanja, prijenosa, smanjena i rasipanja opterećenja.

$$\begin{aligned} SystemCost = & \sum_{p,u} VarCost(u) \cdot G(p,u) + \sum_{p,u} PumpingCost(u) \cdot PUMP(p,u) d\tilde{z} \\ & + \sum_{p,u} SpillageCost \cdot SPILL(p,u) + \sum_{p,u} TransmissionCost \cdot FLOW(p,l) \\ & + \sum_{p,u} CurtailmentCost \cdot CURT(p,n) \\ & + \sum_{p,u} LostLoadCost \cdot LOSTLOAD(p,n) \end{aligned} \quad (1)$$

Funkcija cilja je ograničena setom jednadžbi:

Jednadžba ravnoteže tržišta (2) osigurava da je za svaku državu n u periodu p proizvodnja (proizvodnja iz vlastitih izvora te uvoz električne energije) jednak potražnji:

$$\begin{aligned} \sum_{u \in U} G(p,u) + \sum_{l \in L} FLOW(p,l) \\ = Demand(p,n) + \sum_{u \in PUMP(n)} PUMP(p,u) + CURT(p,n) - LOSTLOAD(p,n) \end{aligned} \quad (2)$$

Proizvodnja električne energije u jednadžbi (3) ograničena je minimalnom i maksimalnom proizvodnjom električne energije svake elektrane u vremenskom periodu:

$$Pmax \cdot dt > G(p,u) > Pmin(u) \cdot dt \quad (3)$$

Električna energija proizvedena u hidroelektranama dana je u jednadžbi (4). *Factor2* koristi se kako bi mogli proizvedenu energiju u GWh pretvoriti u m^3/s . (5)

$$G(p,u) = eta_turb(u) \cdot DIS(p,u) \cdot NominalHead \cdot Factor2 \quad (4)$$

$$Factor2 = 24(h) \cdot 60\left(\frac{min}{h}\right) \cdot 60\left(\frac{s}{min}\right) \cdot Gravity \cdot Density \cdot \frac{1}{3600} \left(\frac{Wh}{J}\right) \cdot \frac{1}{10^9} \left(\frac{GWh}{Wh}\right) \quad (5)$$

Električna energija proizvedena iz obnovljivih izvora energije dana je jednadžbom (6):

$$G(p,u) = Pmax(u) \cdot Profiles(p,u) \cdot dt \quad (6)$$

Ograničenje prijenosne mreže dano je u jednadžbi (7) u kojoj tok snage kroz prijenosnu mrežu ne može biti veće od kapaciteta mreže:

$$FLOW(p,l) \leq LineCapacity(l) \cdot dt \quad (7)$$

Ograničenje izravnjivanja govori da izravnjivanje proizvodnje mora biti niže od ukupne proizvodnje (8):

$$CURT(p,n) = \sum_{u \in CURT(n)} G(p,u) \cdot Location(u,n) \quad (8)$$

Ograničenje vezano uz korištenje vode govori o tome da voda pohranjena u periodu p i izlazni protok iz spremnika mora biti jednak vodi pohranjenoj u periodu $p - 1$ te ulaznom protoku vode (9):

$$\begin{aligned} RES(p, u) - RES(p - 1, u) \\ = Factor1 \cdot (Resources(p, u) - Evaporation(p, u) + UPSTREAM(p, u) \\ + CH(p, u) - DIS(p, u) - SPILL(p, u) - DemandW(p, u)) \end{aligned} \quad (9)$$

Minimalni izlazni protok iz hidroelektrane mora biti veći od propisanog biološkog minimuma (10):

$$Eco_{flow} \leq DIS(p, u) + SPILL(p, u) \quad (10)$$

Najviše dopušteno ispuštanje koristi se za ograničavanje ispuštanja u jednadžbi (11):

$$Spillage_{max8p, u} \geq SPILL(p, u) \quad (11)$$

Voda spremljena u akumulaciji ograničena je maksimalnim i minimalnim volumenom akumulacije u jednadžbi (12):

$$Stmax(p, u) \geq RES(p, u) \geq Stmin(p, u) \quad (12)$$

Crpni režim rada hidroelektrana s akumulacijom prikazan je u jednadžbama (13) i (14):

$$PUMP(p, u) \leq Pmax(u) \cdot dt \quad (13)$$

$$PUMP(p, u) = CH(p, u) \cdot NominalHead(u) \cdot Factor2 \cdot \frac{1}{eta_pump} \quad (14)$$

U jednadžbi (15) i (16) pretpostavlja se da bi se akumulacija mogla napuniti i isprazniti za 2 mjeseca:

$$RES(p, u) - RES(p - 1, u) < \frac{Stmax(u)}{60} \quad (15)$$

$$RES(p - 1, u) - RES(p - 1, u) < \frac{Stmax(u)}{60} \quad (16)$$

Kako bi osigurali minimalno korištenje određene tehnologije i uskladili se sa dostupnom statistikom, dana je jednadžba (17):

$$\sum_{u \in U} G(p, u) \cdot Technology(u, t) \geq Duration(n, t) \cdot \frac{1}{365} \sum_{u \in U} Pmax(u) Location(u, n) \quad (17)$$

Skupom jednadžbi od (1) – (17) opisan je model korištenjem linearnog programiranja.

5. ULAZNI PODATCI ZA Dispa – SET MTHC model

U ovom poglavlju dan je pregled ulaznih podataka za Dispa – SET MTHC model. Referentna godina korištena za podatke o elektranama i profilu potražnje za električnom energijom je 2019. godina jer su za tu godinu dostupni cjeloviti podaci o kapacitetima i profilima. Dostupni hidrološki podaci LISFLOOD – a su od 1990. do 2016. godine, dok dostupni podaci DHMZ – a su od 1990. do 2020. godine. Kao referenta godina hidrometeoroloških podataka određena je 2009. godina te su korišteni podaci LISFLOOD – a. Razlog tomu je što za pojedine hidroelektrane nema dostupnih podataka DHMZ – a ili nema dovoljno mjernih postaja da bi se valjano opisali slivove HE. Za elektroenergetski sustav referentna godina je 2019. godina te za prijenosne tokove referentna godina je 2014. godina, razlog tomu je jer su za tu godinu dostupni podaci o prijenosnim tokovima. [66], [67], [69]

5.1. Podaci o elektranama

Podatci o elektranama oblikovani su u skladu sa uputama Dispa – SET MTHC modela. [67], [69] Za opisivanje termoelektrana, sunčevih elektrana i vjetroelektrana potrebni su podatci o teritorijalnoj pripadnosti, korištenom energentu i kapacitetu elektrane. Za elektrane nije potrebno razdvajati podatke na svaku zasebno, nego sve elektrane koje proizvode električnu energiju korištenjem određenog energenta zapisuju se zajedno (primjerice: sve elektrane na plin mogu se zapisati u zajedničku kategoriju, a ne zasebno). Naziv elektrana napisan je na slijedeći način:

- Država_gorivo_grupirano.

U nazivu *država* se odnosi na teritorijalnu pripadnost, *gorivo* se odnosi na korišteni energent prilikom proizvodnje električne energije te *grupirano* da su elektrane grupirane po korištenom gorivu.

Tablica 12 Ulazni podaci elektrana [17]

GRUPA	INSTALIRANI KAPACITET; [MW]				
	2019.	S1		S2	
		2030	2050	2030	2050
HR_GAS_grupirano	743	743	1300	743	1300
HR_OIL_grupirano	937	-	-	-	-
HR_HRD_grupirano	332	332	-	332	-
HR_WST_grupirano	6	11	17	9	15
HR_BIO_grupirano	71	91	65	91	65
HR_GEO_grupirano	10	10	10	10	10
HR_WIN_grupirano	646	1600	3800	1360	2800
HR_SUN_grupirano	84,8	1039	3800	768	2700

U Tablica 12 dano je stanje kapaciteta elektrana referentne godine te pregled kretanja kapaciteta elektrana prema scenarijima (S1 i S2) danim u *Strategiji energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu*. [7]

Kako je cilj Dispa – SET MTHC modela dobiti rezultate o proizvodnji električne energije HE te razine akumulacija, podaci o HE pisani su za svaku zasebno i to na slijedeći način:

- Država_nazivhidroelektrane_tehnologija.

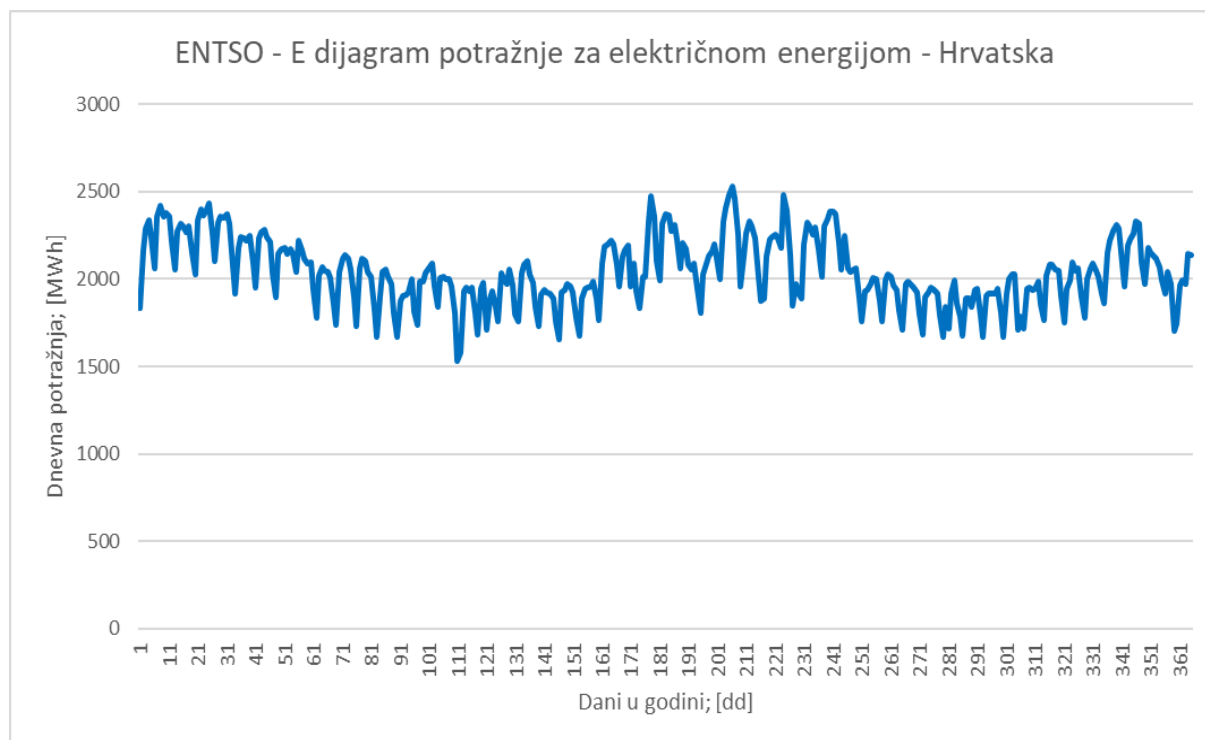
U nazivu pod *država* odnosi se na teritorijalnu pripadnost, *nazivhidroelektrana* odnosi se na naziv hidroelektrane te *tehnologija* odnosi se na tip HE, tj. da li je HE protočna (HROR), akumulacijska (HDAM) ili reverzibilna (HPRS).

Tablica 13 Ulazni podaci hidroelektrana [25]

Naziv	Instalirana snaga; [MW]	Instalirani protok; [m ³ /s]	Neto pad; [m]	Korisni volumen akumulacije; [Mm ³]
HR_Varaždin_HROR	95	450	22	-
HR_Čakovec_HROR	77	500	17,5	-
HR_Dubrava_HROR	80	500	18	-
HR_Ozalj_HROR	5,5	85	9,7	-
HR_Gojak_HROR	57	50	105	-
HR_Zeleni Vir_HROR	1,8	4,4	50	-
HR_Lešće_HROR	42,5	60	38,15	-
HR_Vinodol_HPHS	91,5	18,6	645,5	37,9
HR_Fužine_HPHS	6	9,9	49	33,8
HR_Lepenica_HPHS	1,1	6,2	12,22	1,25
HR_Rijeka_HROR	36,8	21	213	-
HR_Senj_HDAM	216	60	410	1,2
HR_Senj_2_HDAM	342	90	412	2,1
HR_Sklope_HDAM	22,5	50	60	128
HR_Kosinj_HDAM	33,5	50	60	320
HR_Velebit_HPHS	280	60	517	13,65
HR_Golubić_HDAM	7,5	14	59	0,187
HR_Krčić_HROR	0,35	1	37,3	-
HR_Miljacka_HROR	24	32,2	102	-
HR_Jaruga_HROR	7,3	31	24,5	-
HR_Peruća_HDAM	61,2	120	47	540
HR_Orlovac_HPHS	237	70	380	800
HR_Đale_HDAM	40,8	220	21	2,6
HR_Zakučac_HDAM	576	240	250,4	6,8
HR_Kraljevec_HROR	4,8	55	108,9	-
HR_Dubrovnik_HDAM	252	105	275	9
HR_Zavrelje_HDAM	1,9	3	75,8	10

5.2. Podaci o profilu potražnje električne energije

Podaci te profil potražnje električne energije preuzeti su s ENTSO – E Transparency baze podataka. [56]

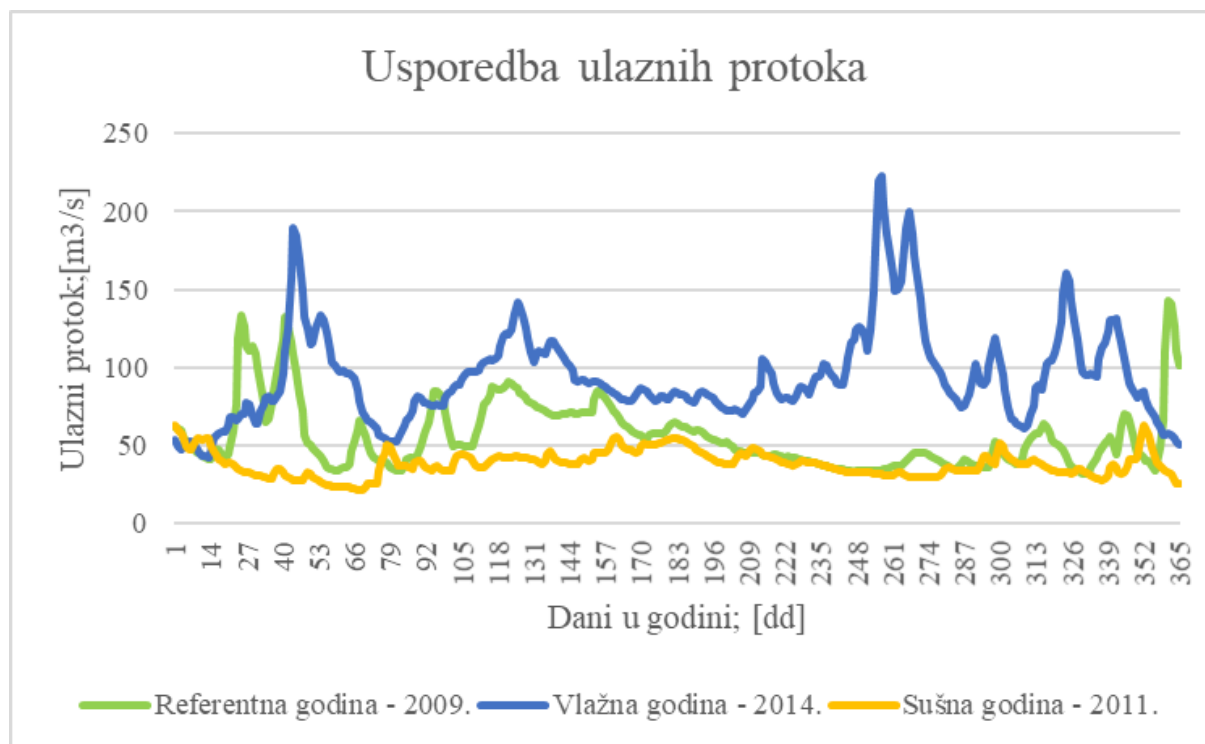


Slika 22 ENTSO - E dijagram potražnje za električnom energijom u 2019. godini – Hrvatska [56]

Ukupna godišnja potražnja za električnom energijom iznosila je 17, 760 TWh, a prosječna dnevna potražnja za električnom energijom iznosila je 2 GWh. Maksimalno dnevno opterećenje iznosilo je 3 038 MW, a maksimalno prosječno dnevno opterećenje iznosilo je 2 256 MW. Oba maksimuma postignuta su 24. srpnja 2019. godine (206. dan u godini) uz činjenicu da je maksimalno dnevno opterećenje postignuto u 13:00 sati. Minimalno dnevno opterećenje iznosilo je 1193 MW postignuto 15. listopada 2019. godine (287. dan u godini) u 04:00 sati, a minimalno prosječno dnevno opterećenje iznosilo je 1530 MW postignuto 9. travnja 2019. godine (111. dan u godini). [56]

5.3. Hidrološki podaci

Korišteni hidrološki podaci ulaznih protoka dobiveni su izračunom LISFLOOD modela opisanog u poglavlju 4.1. Usporedbom dostupnih podataka zaključeno je da se za hidrološki prosječnu godinu koriste podaci 2009. godine, za hidrološki vlažniju godinu koriste se podaci 2014. godine, a za hidrološki sušnu godinu koriste podaci 2011. godine. Promatrano razdoblje hidroloških podataka je od 1990. do 2016. godine. [64]

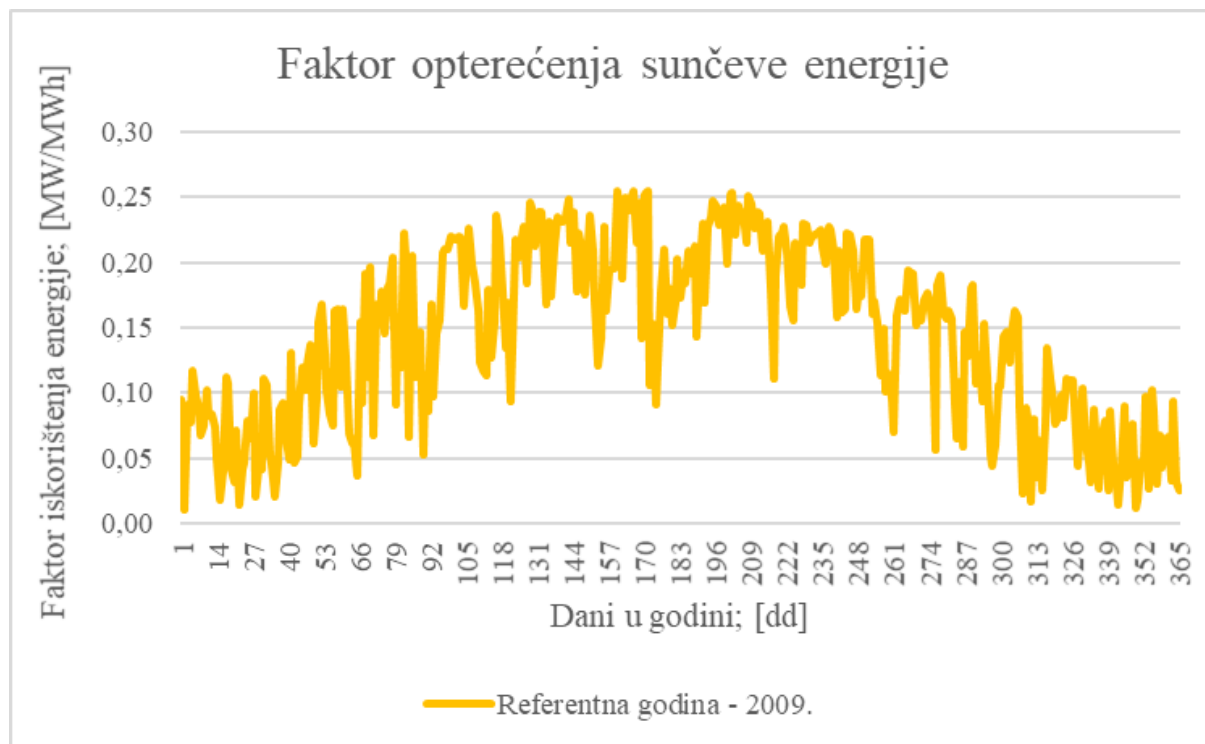


Slika 23 Usporedba protoka referentne, sušne i vlažne godine [64]

Prosječni dnevni protok referentne godine iznosi $142,7 \text{ m}^3/\text{s}$. U hidrološki sušnoj godini prosječni dnevni protok iznosi $62,82 \text{ m}^3/\text{s}$, a u hidrološki vlažnoj godini iznosi $222,35 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.4. Podaci o proizvodnji iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana

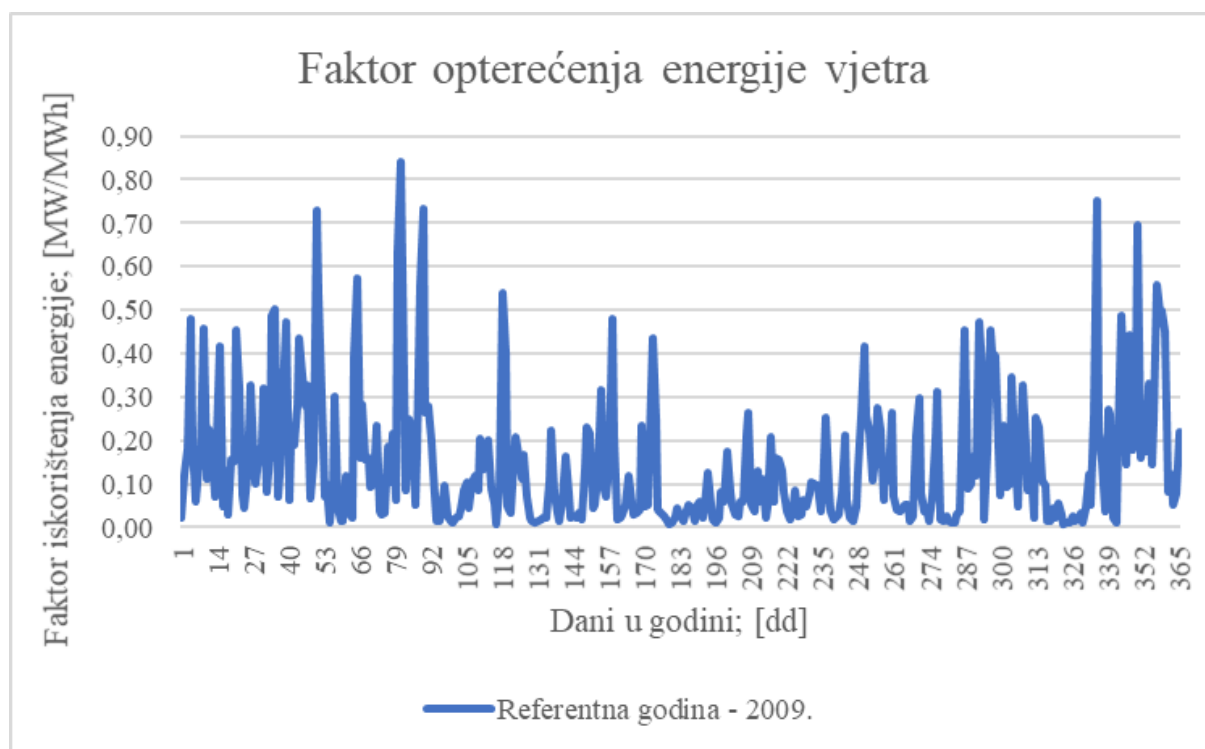
Ukupna instalirana snaga sunčanih elektrana u Hrvatskoj 2019. godine iznosila je 84,4 MW, dok je ukupna instalirana snaga vjetroelektrana iznosila je 646,3 MW. [17], [56], [57]



Slika 24 Faktor opterećenja sunčeve energije tijekom prosječne referentne godine [70]

Prema Slika 24 najoptimalnije razdoblje za proizvodnju električne energije iz sunčanih elektrana je tijekom proljeća i ljeta, dok je najmanje optimalno razdoblje jeseni i zime.

Prema Slika 25 najpogodnije razdoblje za proizvodnju energije iz vjetra tijekom jeseni, zime i tijekom ranog proljeća, dok je najmanji potencijal proizvodnje energije iz vjetra tijekom ljetnog razdoblja.



Slika 25 Faktor opterećenja energije vjetra tijekom prosječne referentne godine [70]

5.5. Podaci o elektroenergetskom sustavu

Podaci o EES – u odnose se na kapacitete za razmjenu električne energije sa susjednim državama, tj. prekogranični neto kapaciteti za razmjenu električne energije (eng. Net Transfer Capacities (NTC)). Hrvatska ima osigurane vodove za razmjenu električne energije s Bosnom i Hercegovinom, Mađarskom, Slovenijom i Srbijom. [56], [71], [72]

Tablica 14 Prekogranični neto kapaciteti za razmjenu električne energije za 2014. godinu [72]

Uvoz; [MW]	Izvoz; [MW]				
	Bosna i Hercegovina	Hrvatska	Mađarska	Slovenija	Srbija
Bosna i Hercegovina	-	1076	-	-	-
Hrvatska	569	-	2597	880	1078
Mađarska	-	789	-	-	-
Slovenija	-	1402	-	-	-
Srbija	-	669	-	-	-

Prema Tablica 14 Hrvatska ima najveći kapacitet za izvoz električne energije sa Slovenijom i Bosnom i Hercegovinom, a najmanje sa Srbijom. Najveći kapacitet za uvoz električne energije Hrvatska ima s Mađarskom i Srbijom, a najmanji sa Bosnom i Hercegovinom.

5.6. Topologija

Topologijom je definirana mreža hidroelektrana, tj. opisani su povezani sustavi te da li su hidroelektrane hidrološki ovise jedna o drugoj (kaskadni sustavi). U topologiji su definirane hidroelektrane koje koriste protoke istih vodotoka.

U Hrvatskoj postoje pet takvih sustava:

- HE Gojak → HE Lešće
- HE Golubić + mHE Krčić → HE Miljacka → HE Jaruga
- HE Peruća + HE Orlovac → HE Đale → HE Zakućac + HE Kraljevac
- HE Varaždin → HE Čakovec → HE Dubrava
- HE Sklope → HE Kosinj → HE Senj + HE Senj 2.

5.7. Potražnja za vodom

U energetske sektoru, osim proizvodnje električne energije pomoću energije vode, voda se još koristi kao rashladni medij za hlađenje termoelektrana. Voda zauzima bitan položaj i izvan energetskog sektora, kao što je u poljoprivredi i vodoopskrbi. Podatke i načine korištenja vode u navedenim sektorima teško je kvantificirati stoga je unijeta pretpostavka o korištenju vode izvan energetskih usluga. Procijenjeno je da minimalna potražnja za vodom izvan energetskog sektora iznosi 20 % korisnog volumena akumulacije hidroelektrana.

6. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

U diplomskom radu su promatrani različiti tipovi hidroloških godina, tj. promatrane su hidrološki prosječna godina za koju su odabrani hidrometeorološki podaci 2015. godine, hidrološki vlažna godina za koju su odabrani hidrometeorološki podaci 2010. godine te hidrološki vlažna godina za koju su odabrani hidrometeorološki podaci 2007. godine. Ulazni podaci korišteni za provedbu simulacije proizvodnje hidroelektrana Dispa – SET MTHC modelom su izlazni podaci LISFLOOD modela. Na Slika 23 prikazana je grafička usporedba odabranih hidroloških podataka prema tipu hidrološke godine.

Referentni podaci o elektroenergetskom sustavu su podaci iz 2019. godine. Promatrani su različiti uvjeti EES – a prema *Strategiji energetske razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu* te su ti uvjeti EES – a detaljnije opisani u Poglavljju 3.4. EES promatran je u 2030. godini te 2050. godini u dva scenarija:

- Scenarij ubrzane energetske tranzicije – S1 [7]
- Scenarij umjerene energetske tranzicije – S2. [7]

Svaki scenarij promatran je u tri hidrološki različite godine, hidrološki prosječnoj, vlažnoj te sušnoj godini. Kao rezultat Dispa – SET MTHC modela dobivene su tri skupine podataka za referentnu godinu te šest skupina izlaznih podataka za 2030. godinu te jednako tako i za 2050. godinu. Izlazni podaci referentnog stanja uspoređivani su sa stvarnim statističkim podacima, a izlazni podaci scenarija 1 i 2 uspoređivani su međusobno.

6.1. Analiza proizvodnje hidroelektrana u referentnom stanju

Rezultati Dispa – SET MTHC modela o proizvodnji hidroelektrana uspoređivani su sa stvarnim statističkim podacima iz *Energija u Hrvatskoj 2009. godine* [73], *Energija u Hrvatskoj 2014. godine* [74] te *Energija u Hrvatskoj 2011. godine* [75]. Korištenjem stvarnih statističkih podataka procijenjena je točnost dobivenih rezultata iz Dispa – SET MTHC modela za hidrološki različite godine. U Tablica 15 dana je usporedba dobivenih rezultata i statističkih podataka.

Tablica 15 Usporedba Dispa - SET MTHC podataka sa stvarnim statističkim podacima referentnog stanja [73]–[75]

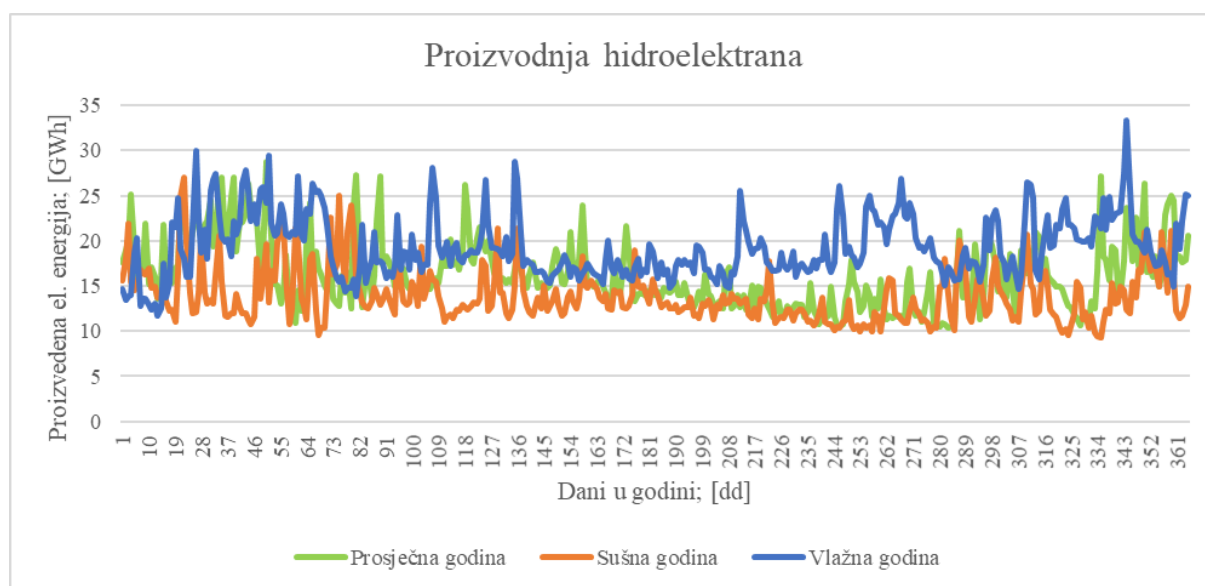
Hidrološki tip referentne godine	Dispa - SET MTHC model	<i>Energija u Hrvatskoj 2009. godine, Energija u Hrvatskoj 2014. godine, Energija u Hrvatskoj 2011. godine</i>		
	Proizvodnja iz HE; [GWh]	Proizvodnja iz HE; [GWh]	Razlika; [GWh]	Razlika; [%]
Prosječna godina	5923	6767	-844	12%
Vlažna godina	7035	9068	-2033	22%
Sušna godina	5071	4577	494	-11%

Rezultati dobiveni Dispa – SET MTHC modelom razlikuju se od stvarnih statističkih podataka. Podatak dobiven simulacijom Dispa – SET MTHC modela o proizvodnji električne energije iz hidroelektrana tijekom hidrološki prosječne godine za 12 % je manji od stvarne izmjerene statističke vrijednosti. Razlika između dobivenog podatka Dispa – SET MTHC modela i stvarnog izmjerenog statističkog podatka za hidrološki sušnu godinu jest – 11 %, tj. dobiveni podatak veći je od statističkog podatka, dok je razlika za hidrološki sušnu godinu 22 %, tj. rezultat dobiven simulacijom Dispa – SET MTHC modela je za 22 % manji od statističkog podatka. Potrebno je uzeti u obzir i činjenicu da prilikom proračuna vlažne i sušne godine promijenjeni su samo hidrometeorološki podaci, dok su podaci o elektroenergetskom sustavu ostali kao kod referentne prosječne godine te je to jedan od mogućih razloga velikog razlikovanja dobivenog rezultata Dispa – SET MTHC modela te statističkog podatka kod vlažne godine. [17], [76]–[78]

Iz Tablica 15 vidljivo je kako je proizvodnja električne energije iz hidroelektrana je najviša tijekom hidrološki vlažne godine, zatim slijedi proizvodnja tijekom prosječne godine te je

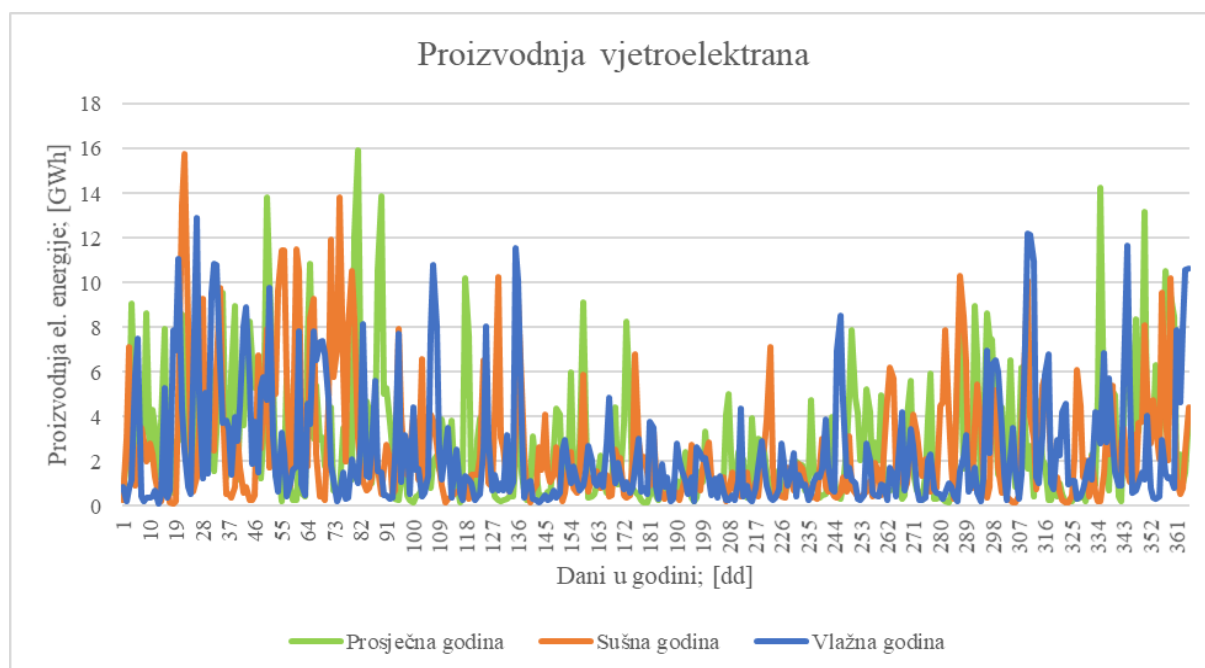
najmanja proizvodnja električne energije iz hidroelektrana tijekom sušne godine. Ovakav trend je očekivan te je u skladu s trendom koji se pojavljuje u statističkim podacima. [73]–[75]

Na Slika 26 prikazana je proizvodnja hidroelektrana tijekom godine s obzirom na hidrološke uvjete. Tijekom ljetnog perioda proizvodnja iz hidroelektrana je manja, dok je u periodu proljeća, jeseni i zime proizvodnja iz hidroelektrana povećana. Ukupna godišnja proizvodnja iz hidroelektrana tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 5 923 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 7 035 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 5 071 GWh.



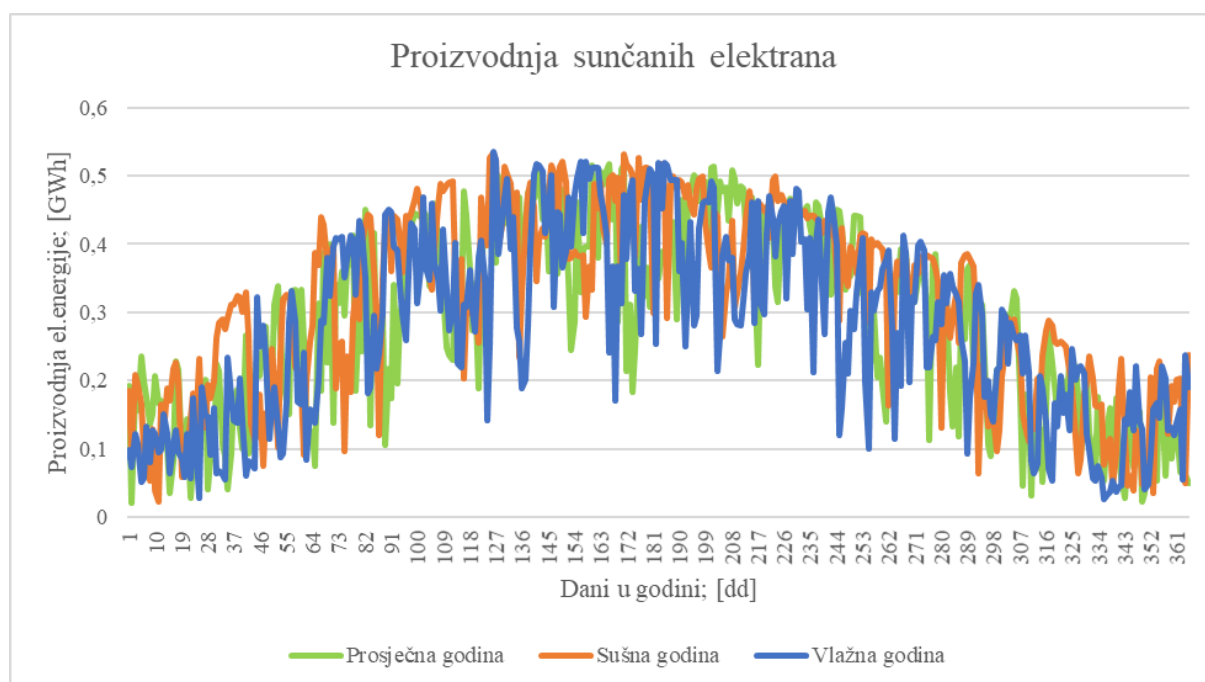
Slika 26 Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – referentna godina

U nastavku je dan pregled proizvodnje iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana te položaj proizvodnje iz obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom.



Slika 27 Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model – referentna godina

Na Slika 27 prikazana je proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 1 015 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 950 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 898 GWh. Razdoblje najpogodnije za proizvodnju električne energije iz vjetroelektrana je tijekom ranog proljeća, jeseni te zime. Period najmanje proizvodnje iz vjetroelektrana je ljeto.



Slika 28 Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – referentna godina

Na Slika 28 prikazana je proizvodnja električne energije iz sunčanih elektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 106 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 103 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 116 GWh. Razdoblje najpogodnije za proizvodnju električne energije iz sunčanih elektrana je tijekom kasnog proljeća i ljeta. Periodi najmanje proizvodnje iz vjetroelektrana su jesen i zima.

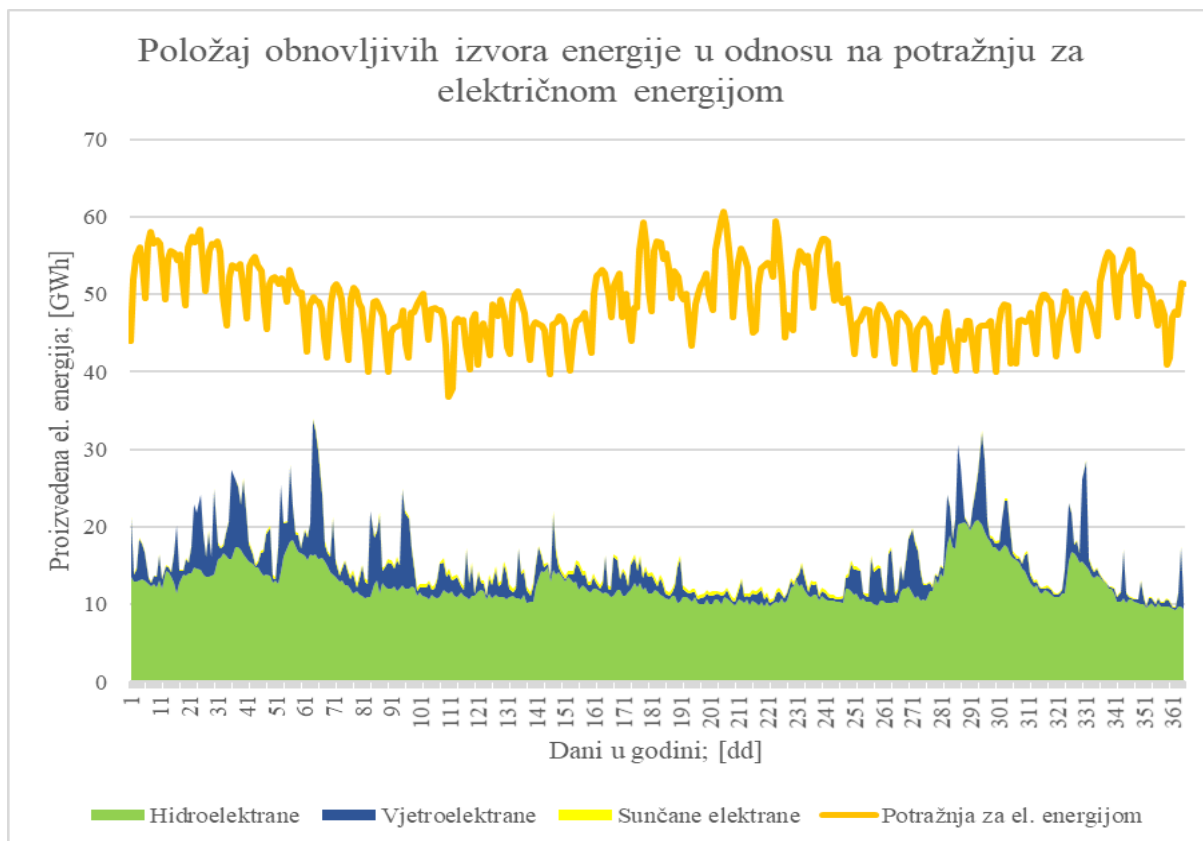
Iz Tablica 16 primjetno je kako vlažna godina ima najveću proizvodnju iz hidroelektrana te najmanju proizvodnju iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana. S druge strane sušna godina ima najmanju proizvodnju iz hidroelektrana, dok ima najveću proizvodnju iz sunčanih elektrana. Prosječna godina ističe se najvećom proizvodnjom iz vjetroelektrana. Iz navedenog može se zaključiti kako je proizvodnja iz hidroelektrana te sunčanih elektrana povezana hidrometeorološkim uvjetima, tj. hidrološkim uvjetima te uvjetima osunčanosti, dok meteorološki uvjeti vjetra su nepredvidljivi i nisu jasno povezani s hidrološkim tipom godine.

Tablica 16 Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana - referentna godina

Godina	Tip scenarija	Proizvodnja iz hidroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz hidroelektrana u odnosu na referentnu godinu; [GWh]			
		Prosječna godina	Vlažna godina	Sušna godina	Vlažna godina		Sušna godina	
2019	Referentni scenarij	4801	6034	4005	-1233	20%	796	-20%
		Proizvodnja iz vjetroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz vjetroelektrana u odnosu na referentnu godinu; [GWh]			
		Prosječna godina	Vlažna godina	Sušna godina	Vlažna godina		Sušna godina	
		1015	898	950	117	-13%	65	-7%
		Proizvodnja iz sunčanih elektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz sunčanih elektrana u odnosu na referentnu godinu; [GWh]			
		Prosječna godina	Vlažna godina	Sušna godina	Vlažna godina		Sušna godina	
		106	103	116	4	-4%	-10	8%
		Ukupna proizvodnja iz obnovljivih izvora energije; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz obnovljivih izvora energije u odnosu na referentnu godinu; [GWh]			
		Prosječna godina	Vlažna godina	Sušna godina	Vlažna godina		Sušna godina	
		5923	7035	5071	-1112	16%	852	-17%

Na Slika 29 prikazan je položaj obnovljivih izvora energije (OIE) u odnosu na potražnju za električnom energijom te se može zaključiti kako trenutni kapaciteti OIE nisu dovoljni kako bi se zadovoljila potražnja za električnom energijom. Ukupna godišnja potražnja za električnom energijom iznosi 18 893,3 GWh, a proizvodnja iz OIE dobivena iz Dispa – SET MTHC modela

iznosi 5 923 GWh, što predstavlja 32 % ukupne potražnje za električnom energijom. Razlika između potražnje i proizvodnje iz OIE trenutno se nadomješta proizvodnjom iz drugih izvora energije poput ugljena, prirodnog plina, nafte, nuklearne energije ili uvozom električne energije. [17], [56]



Slika 29 Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom
– referentna godina [56]

6.2. Analiza rezultata scenarija 1

Scenarij 1 predstavlja scenarij ubrzane energetske tranzicije. Postavlja visoke ciljeve i očekivanja pred elektroenergetski sustav gdje bi bili osmišljeni novi načini poticanja i ulaganja u energetske sektor. Ovim scenarijom predviđa se veći udio obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije te djelomično napuštanje proizvodnje električne energije iz fosilnih izvora energije. Scenarij 1 predstavlja scenarij visokih investicija u EES – u. [7]

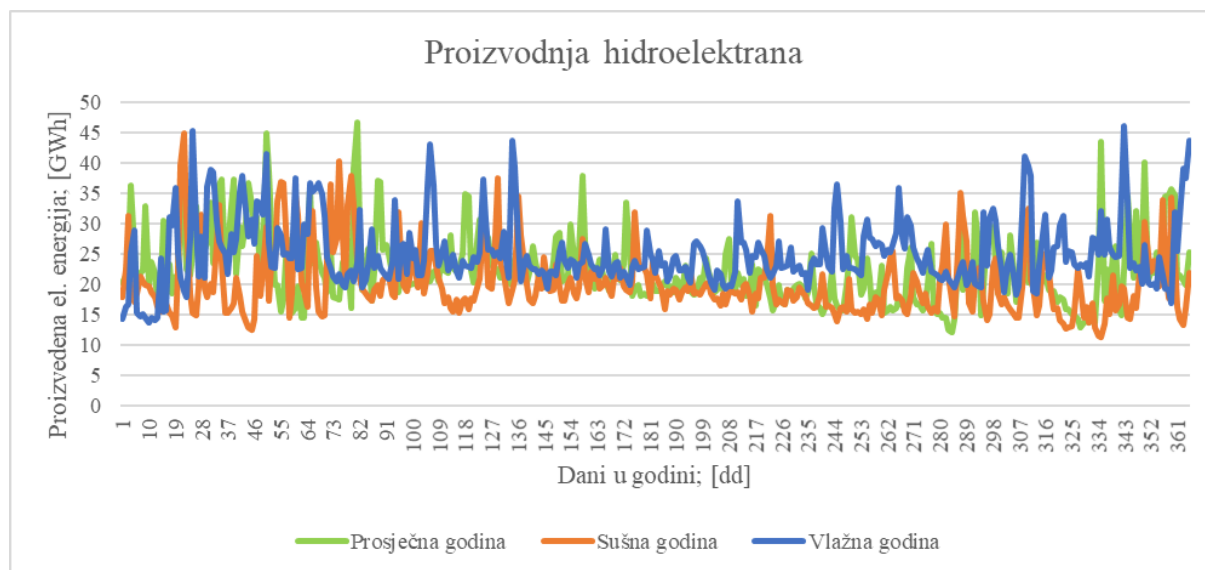
Tablica 17 Promjena kapaciteta za proizvodnju električne energije – S1 [7], [17]

Kapaciteti za proizvodnju električne energije	2019. godina; [MW]	2030. godina; [MW]	2050. godina; [MW]
Elektrane na biomasu	91	91	65
Elektrane na naftu	937	0	0
Elektrane na prirodni plin	743	743	1 300
Elektrane na otpad	6	11	17
Elektrane na ugljen	332	332	0
Geotermalne elektrane	10	10	10
Hidroelektrane	2 146	2 521	2 521
Sunčane elektrane	84,4	1 039	3 800
Vjetroelektrane	646,3	1 600	3 800
Ukupno:	5 107	5 936	11 204

Scenarij 1 promatran je u 2030. i 2050. godini pri različitim hidrološkim uvjetima., u hidrološki prosječnoj, hidrološki vlažnoj te hidrološki sušnoj godini. Dobiveni rezultati Dispa – SET MTHC modela međusobno su uspoređeni.

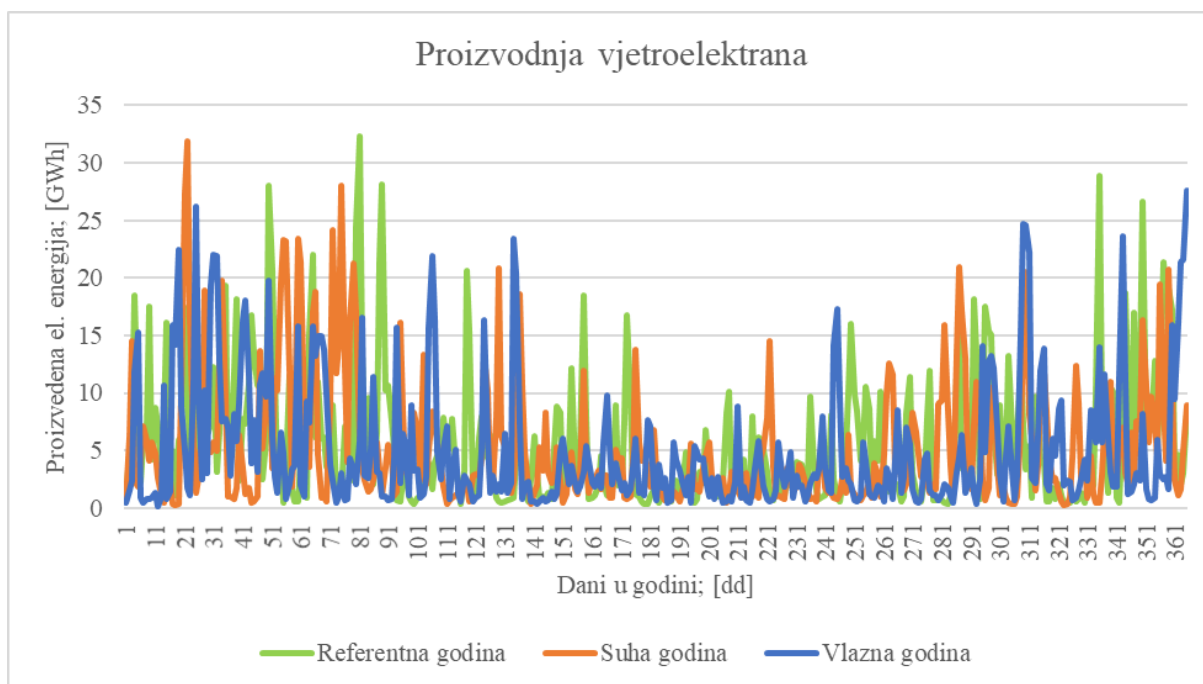
6.2.1. Rezultati scenarija 1 za 2030. godinu

Na Slika 30 prikazana je proizvodnja hidroelektrana tijekom godine s obzirom na hidrološke uvjete. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije iz hidroelektrana tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 4 795 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 6 037,7 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 4 014,48 GWh.



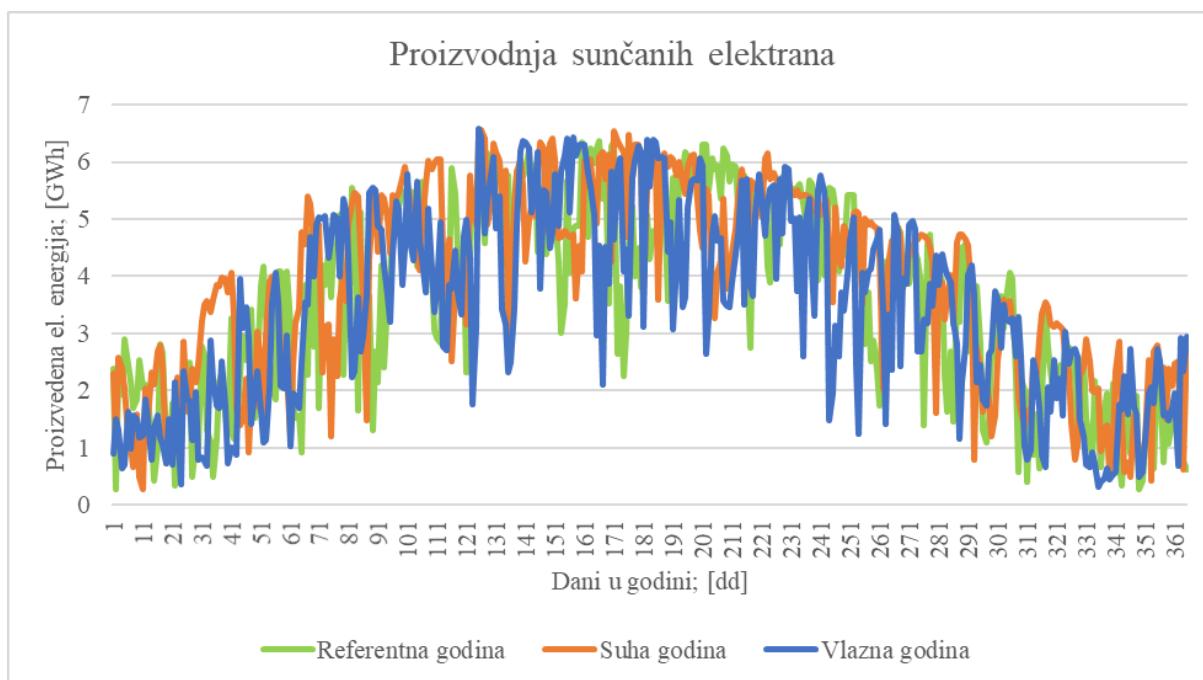
Slika 30 Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – 2030 – S1

Na Slika 31 prikazana je proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 2 056,7 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 1 845,4 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 1 924,8 GWh.



Slika 31 Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model – 2030 – S1

Na Slika 32 prikazana je proizvodnja električne energije iz sunčanih elektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 1 308,9 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 1 264,7 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 1 426 GWh.



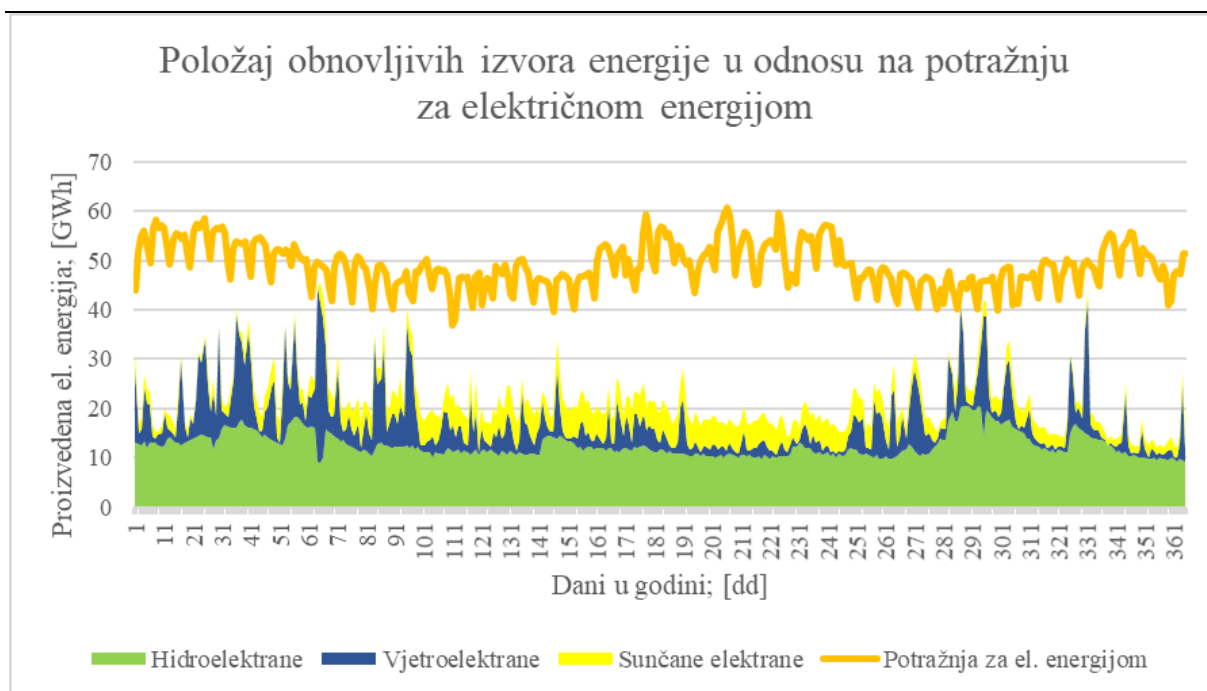
Slika 32 Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – 2030 - S1

Iz Tablica 18 primjetno je kako vlažna godina ima najveću proizvodnju iz hidroelektrana te najmanju proizvodnju iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana. S druge strane sušna godina ima najmanju proizvodnju iz hidroelektrana, dok ima najveću proizvodnju iz sunčanih elektrana. Prosječna godina ističe se najvećom proizvodnjom iz vjetroelektrana. Iz navedenog može se zaključiti kako je proizvodnja iz hidroelektrana te sunčanih elektrana povezana hidrometeorološkim uvjetima, tj. hidrološkim uvjetima te uvjetima osunčanosti, dok su meteorološki uvjeti vjetra nepredvidljivi te nisu jasno povezani s hidrološkim tipom godine.

Tablica 18 Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana – 2030 – S1

Godina	Tip scenarija	Proizvodnja iz hidroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz hidroelektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
2030	S1	4795	6038	4015	-1243	20%	781	-19%
		Proizvodnja iz vjetroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz vjetroelektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		2057	1845	1925	212	45%	132	-7%
		Proizvodnja iz sunčanih elektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz sunčanih elektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		1309	1265	1426	44	-3%	-117	8%
		Ukupna proizvodnja iz obnovljivih izvora energije; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz obnovljivih izvora energije u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		8161	9148	7365	-987	11%	796	-11%

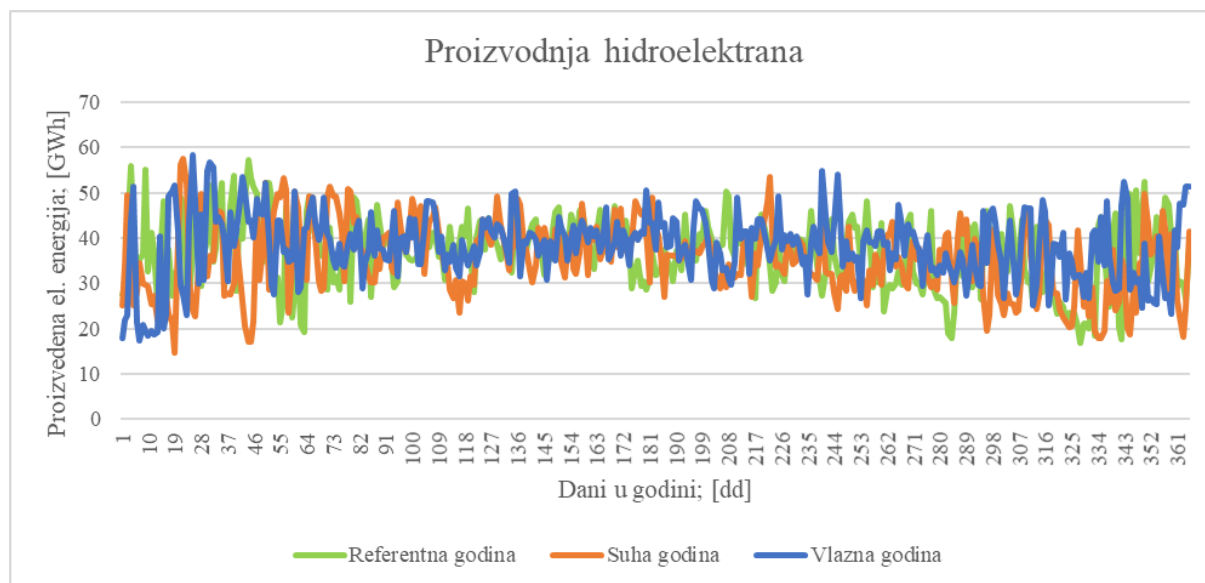
Na Sliku 33 prikazan je položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom te se može zaključiti kako kapaciteti OIE u 2030. godini nisu dostatni da bi se zadovoljila dnevna, niti godišnja potražnja za električnom energijom. Ukupna godišnja potražnja za električnom energijom iznosi 18 893,3 GWh, a proizvodnja električne energije iz OIE dobivena iz Dispa – SET MTHC modela iznosi 8 161 GWh, što predstavlja 43,2 % ukupne potražnje za električnom energijom. Razlika između dnevne potražnje i proizvodnje iz OIE može se nadomjestiti proizvodnjom iz drugih izvora energije poput prirodnog plina, bioplina, nuklearne energije ili uvozom električne energije kako je predviđeno *Strategijom energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu*. [7], [56]



Slika 33 Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom
 – Dispa – SET – MTHC model – 2030 – S1 [56]

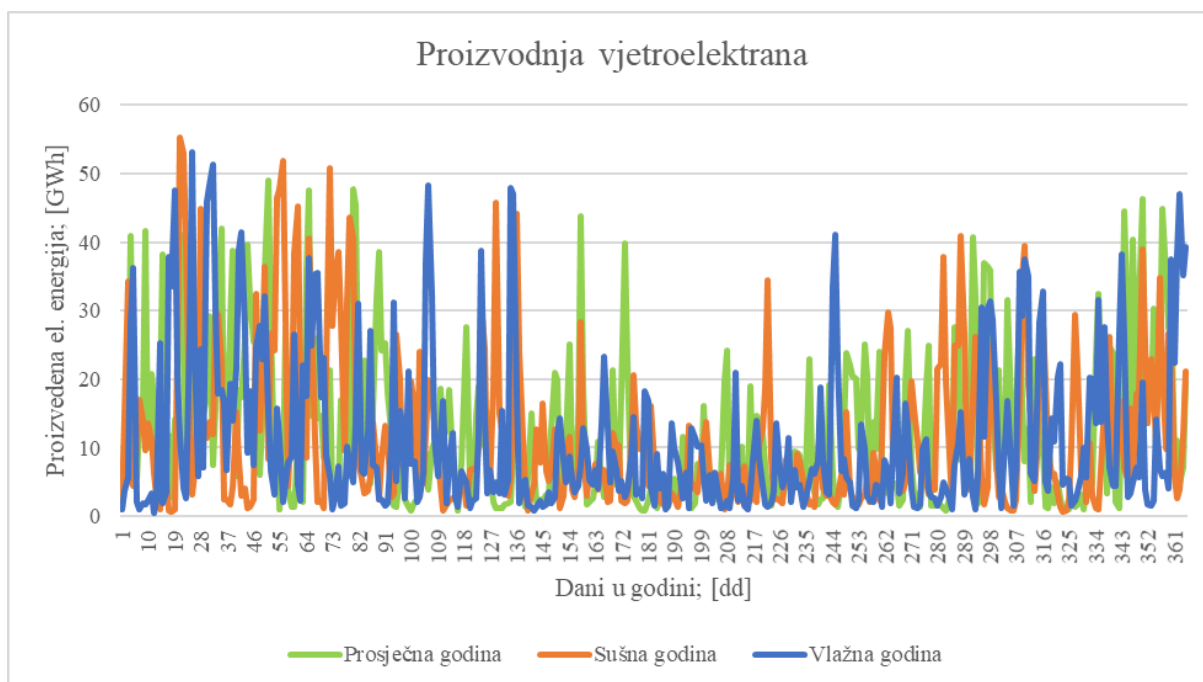
6.2.2. Rezultati scenarija 1 za 2050. godinu

Na Slika 34 prikazana je proizvodnja hidroelektrana tijekom godine s obzirom na hidrološke uvjete. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije iz hidroelektrana tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 4 177,2 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 5 337,7 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 3 574,3 GWh.



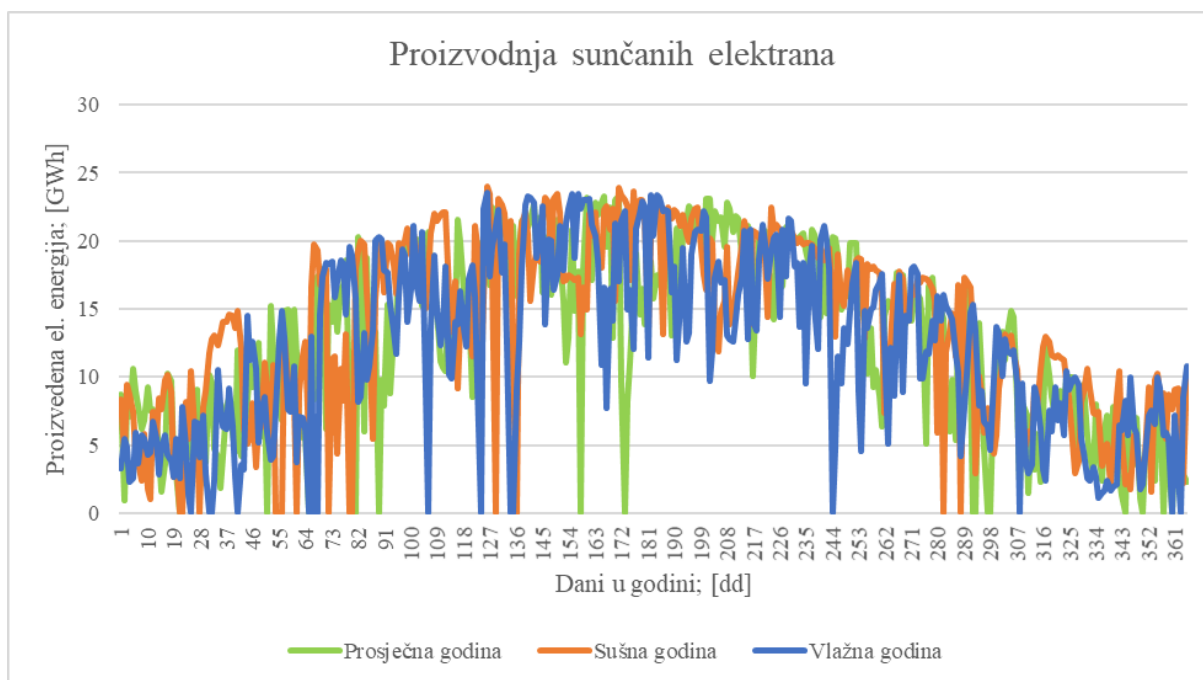
Slika 34 Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S1

Na Slika 35 prikazana je proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 4 541 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 4 141,6 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 4 302,16 GWh.



Slika 35 Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S1

Na Slika 36 prikazana je proizvodnja električne energije iz sunčanih elektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 4 658 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 4 464 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 5 005,3 GWh.



Slika 36 Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S1

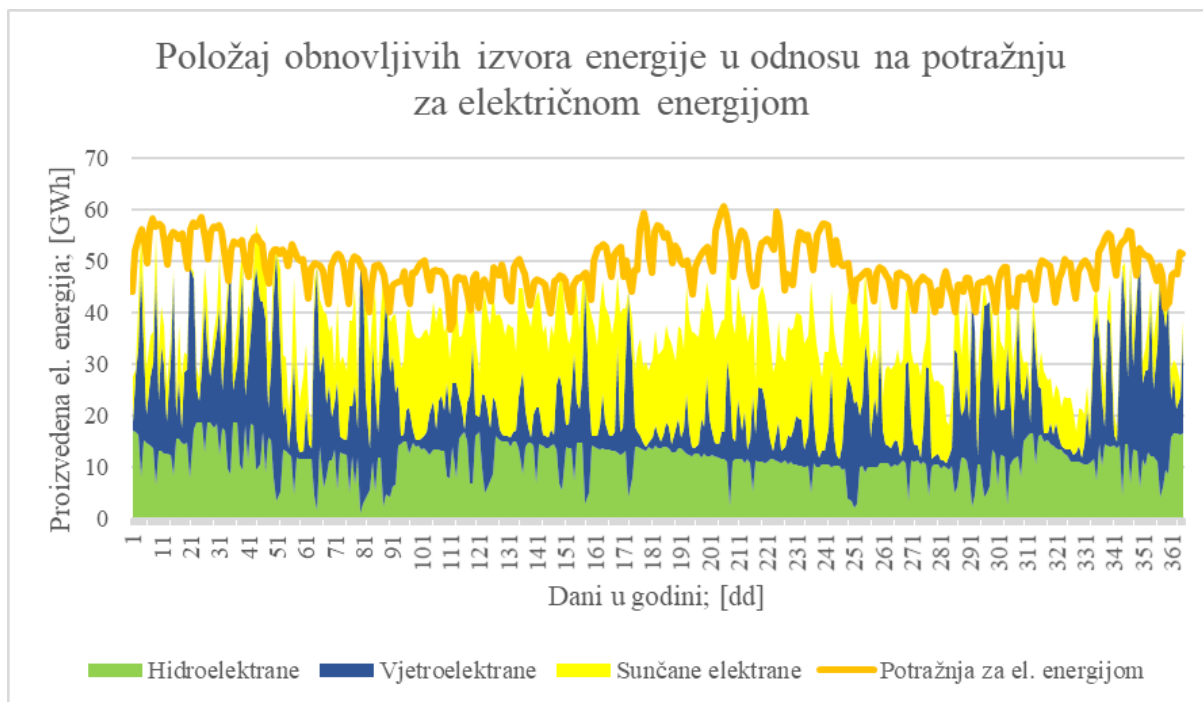
Iz Tablica 19 primjetno je kako vlažna godina ima najveću proizvodnju iz hidroelektrana te najmanju proizvodnju iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana. S druge strane sušna godina ima najmanju proizvodnju iz hidroelektrana, dok ima najveću proizvodnju iz sunčanih elektrana. Prosječna godina ističe se najvećom proizvodnjom iz vjetroelektrana. Iz navedenog može se zaključiti kako je proizvodnja iz hidroelektrana te sunčanih elektrana povezana hidrometeorološkim uvjetima, tj. hidrološkim uvjetima te uvjetima osunčanosti, dok meteorološki uvjeti vjetra su nepredvidljivi te nisu jasno povezani s hidrološkim tipom godine.

Tablica 19 Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana – 2050 – S1

Godina	Tip scenarija	Proizvodnja iz hidroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz hidroelektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
2050	S1	4177	5338	3574	-1160	22%	603	-17%
		Proizvodnja iz vjetroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz vjetroelektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		4541	4142	4302	399	-10%	239	-6%
		Proizvodnja iz sunčanih elektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz sunčanih elektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		4658	4464	5005	194	-4%	-347	7%
		Ukupna proizvodnja iz obnovljivih izvora energije; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz obnovljivih izvora energije u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		13376	13943	12882	-567	4%	495	-4%

Na Slika 37 prikazan je položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom te se može zaključiti kako kapaciteti OIE planirani scenarijem 1 u 2050. godini mogu zadovoljiti svu dnevnu potražnju za električnom energijom tijekom pojedinih dana u godini. Ukupna godišnja potražnja za električnom energijom iznosi 18 893,3 GWh te ona nije u cijelosti zadovoljena proizvodnjom električne energije iz OIE. Proizvodnja električne energije iz OIE dobivena iz Dispa – SET MTHC modela iznosi 13 376 GWh, što predstavlja 70,8 % ukupne potražnje za električnom energijom. Razlika između dnevne potražnje i proizvodnje iz OIE može se nadomjestiti proizvodnjom iz drugih izvora energije poput prirodnog plina, bioplina, nuklearne energije ili uvozom električne energije kako je predviđeno

Strategijom energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu. [7], [56]



Slika 37 Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom
– Dispa – SET – MTHC model – 2050 – S1 [56]

6.3. Analiza rezultata scenarija 2

Scenarij 2 jest scenarij umjerene energetske tranzicije. Predstavlja i ima slične ciljeve kao scenarij 1, no s nešto manjim očekivanjima i investicijskim ulaganjima. [7]

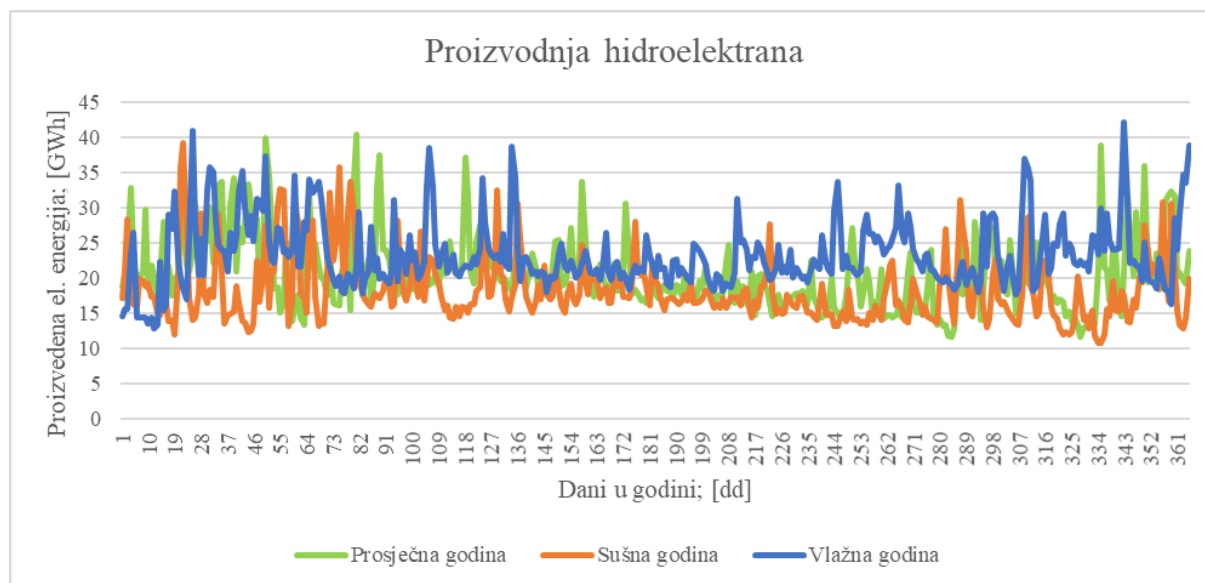
Tablica 20 Promjena kapaciteta za proizvodnju električne energije – S2 [7], [17]

Kapaciteti za proizvodnju električne energije	2019. godina; [MW]	2030. godina; [MW]	2050. godina; [MW]
Elektrane na biomasu	91	91	65
Elektrane na naftu	937	0	0
Elektrane na prirodni plin	743	743	1 300
Elektrane na otpad	6	9	15
Elektrane na ugljen	332	332	0
Geotermalne elektrane	10	10	10
Hidroelektrane	2 146	2 521	2 521
Sunčane elektrane	84,4	768	2 700
Vjetroelektrane	646,3	1 360	2 800
Ukupno:	5 107	5 420	9 097

Scenarij 2 promatran je u 2030. i 2050. godini pri različitim hidrološkim uvjetima., u hidrološki prosječnoj, hidrološki vlažnoj te hidrološki sušnoj godini. Dobiveni rezultati Dispa – SET MTHC modela međusobno su uspoređeni.

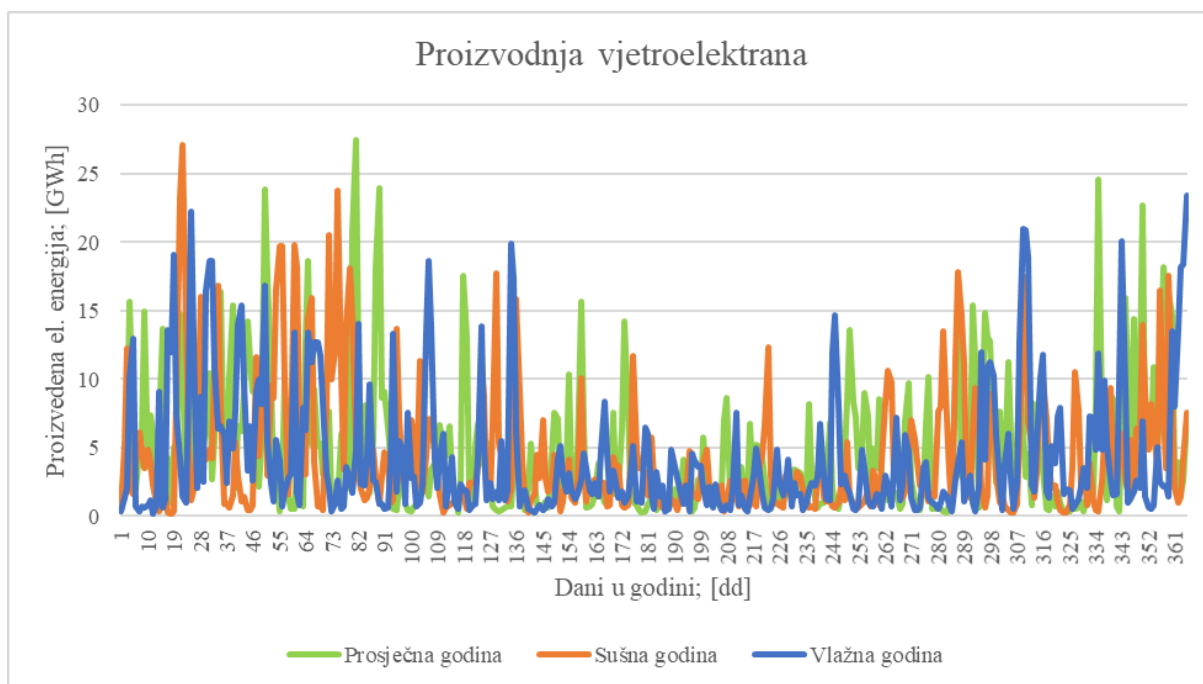
6.3.1. Rezultati scenarija 2 za 2030. godinu

Na Slika 38 prikazana je proizvodnja hidroelektrana tijekom godine s obzirom na hidrološke uvjete. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije iz hidroelektrana tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 4 801 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 6 036,5 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 4 006,9 GWh.



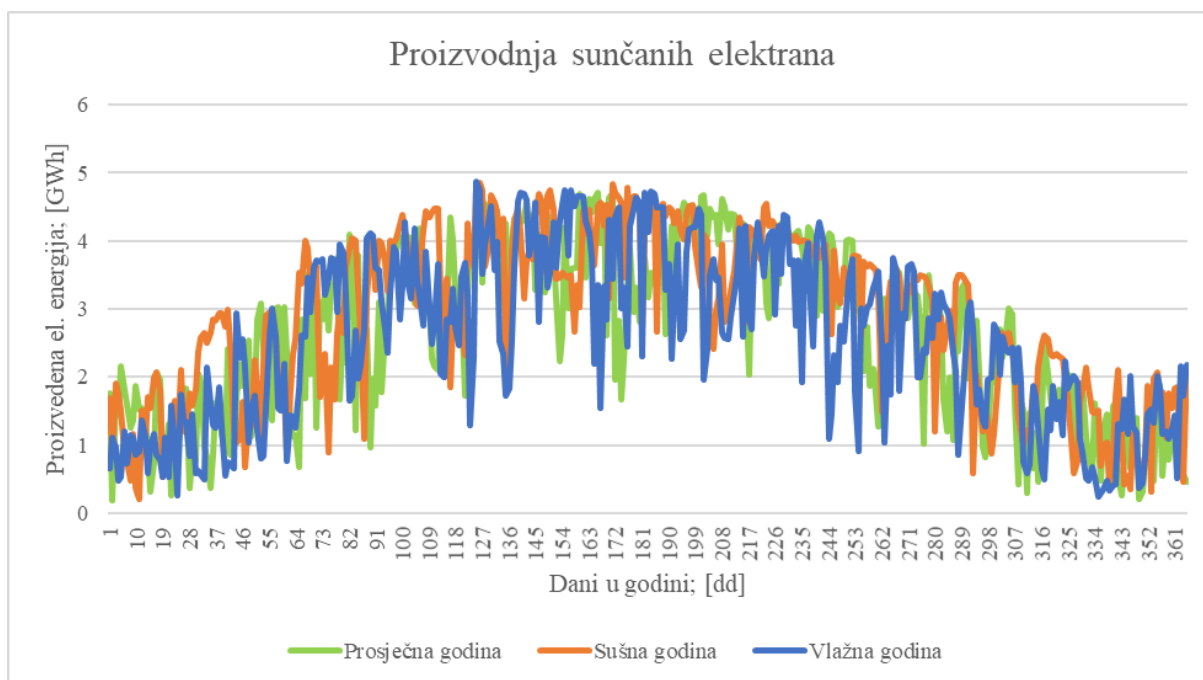
Slika 38 Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – 2030 – S2

Na Slika 39 prikazana je proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja električne energije tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 1 748,2 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 1 568,6 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 1 636 GWh.



Slika 39 Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model - 2030 - S2

Na Slika 40 prikazana je proizvodnja električne energije iz sunčanih elektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 967,5 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 934,8 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 1 054 GWh.



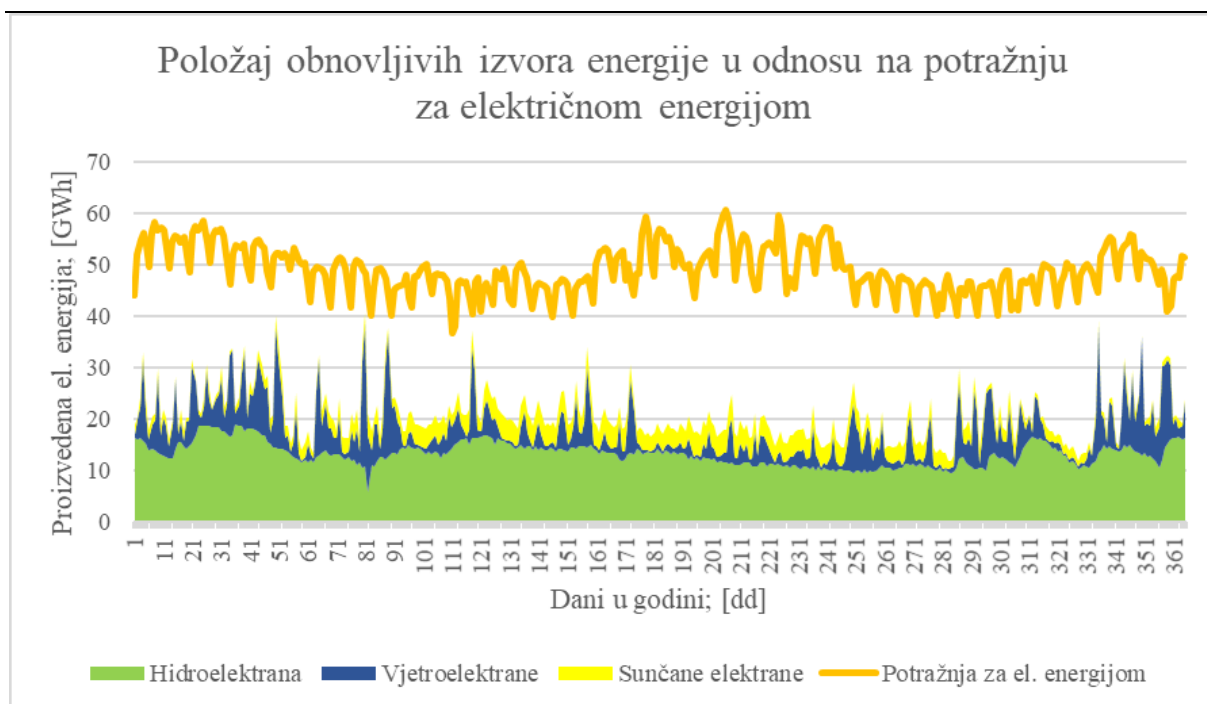
Slika 40 Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – 2030 – S2

Iz Tablica 21 primjetno je kako vlažna godina ima najveću proizvodnju iz hidroelektrana te najmanju proizvodnju iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana. S druge strane sušna godina ima najmanju proizvodnju iz hidroelektrana, dok ima najveću proizvodnju iz sunčanih elektrana. Prosječna godina ističe se najvećom proizvodnjom iz vjetroelektrana. Iz navedenog može se zaključiti kako je proizvodnja iz hidroelektrana te sunčanih elektrana povezana hidrometeorološkim uvjetima, tj. hidrološkim uvjetima te uvjetima osunčanosti, dok meteorološki uvjeti vjetra su nepredvidljivi te nisu jasno povezani s hidrološkim tipom godine.

Tablica 21 Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana – 2030 – S2

Godina	Tip scenarija	Proizvodnja iz hidroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz hidroelektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
2030	S2	4801	6037	4007	-1236	20%	794	-20%
		Proizvodnja iz vjetroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz vjetroelektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		1748	1569	1636	180	-11%	112	-7%
		Proizvodnja iz sunčanih elektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz sunčanih elektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		967	935	1054	33	-3%	-87	8%
		Ukupna proizvodnja iz obnovljivih izvora energije; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz obnovljivih izvora energije u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		7517	8540	6697	-1023	12%	820	-12%

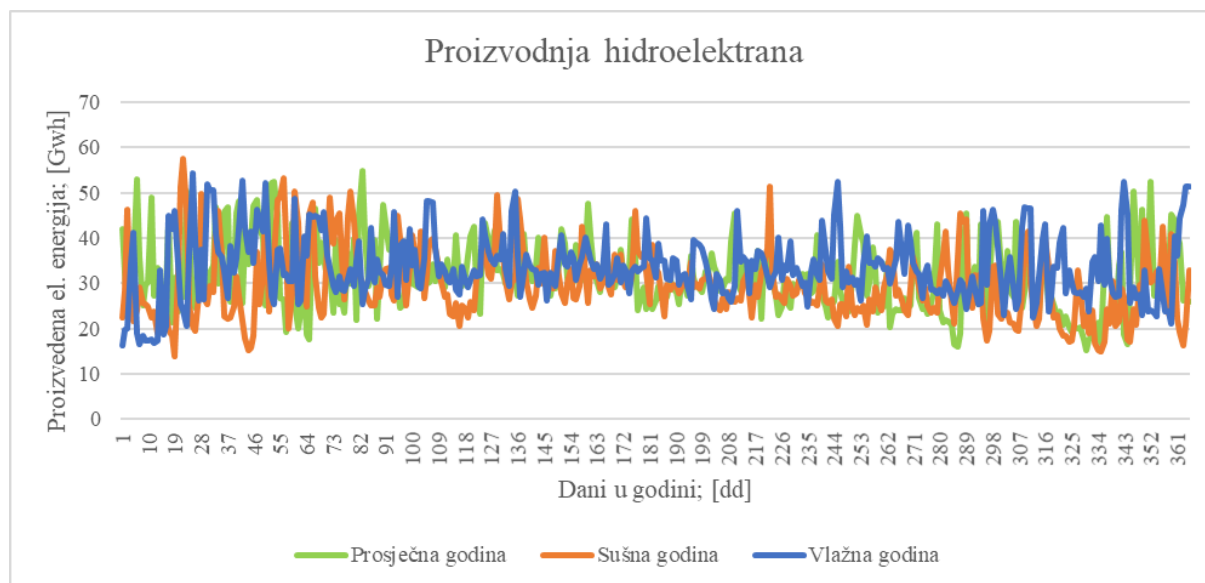
Na Slika 41 prikazan je položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom te se može zaključiti kako kapaciteti OIE u 2030. godini nisu dostatni da bi se zadovoljila dnevna, niti godišnja potražnja za električnom energijom. Ukupna godišnja potražnja ta električnom energijom iznosi 18 893,3 GWh, a proizvodnja električne energije iz OIE dobivena iz Dispa – SET MTHC modela iznosi 7 517 GWh, što predstavlja 38,8 % ukupne potražnje za električnom energijom. Razlika između dnevne potražnje i proizvodnje iz OIE može se nadomjestiti proizvodnjom iz drugih izvora energije poput prirodnog plina, nuklearne energije ili uvozom električne energije kako je predviđeno *Strategijom energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu*. [7], [56]



Slika 41 Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom
 – Dispa – SET – MTHC model – 2030 – S2 [56]

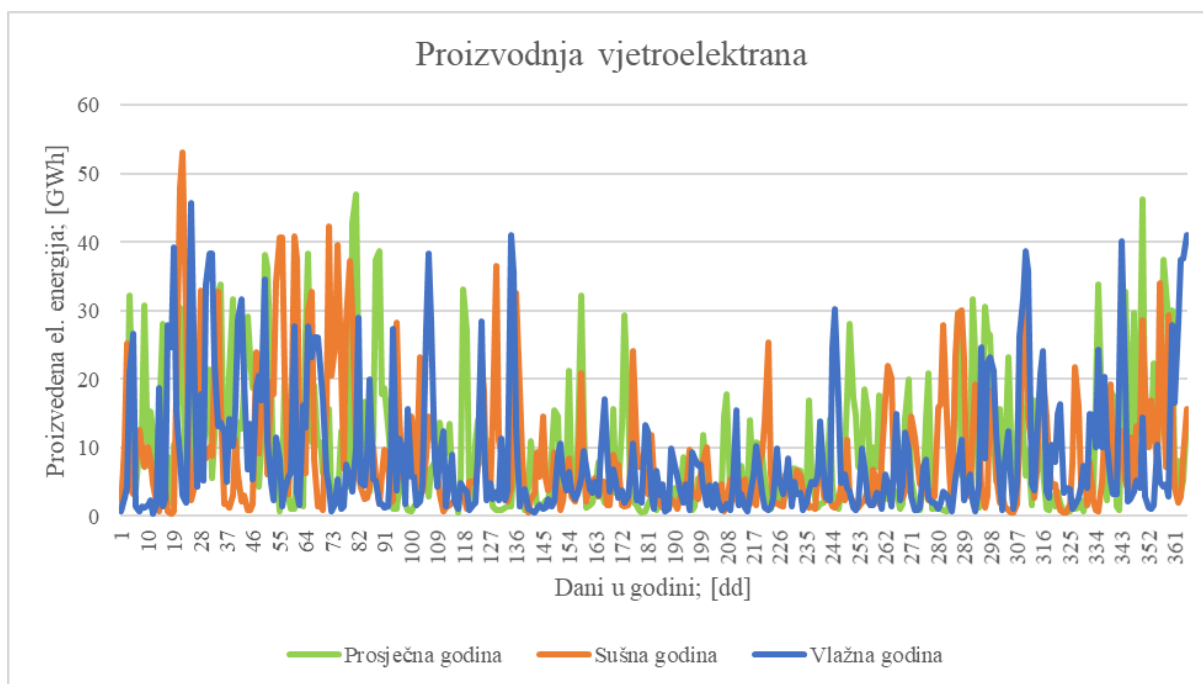
6.3.2. Rezultati scenarija 2 za 2050. godinu

Na Slika 42 prikazana je proizvodnja hidroelektrana tijekom godine s obzirom na hidrološke uvjete. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije iz hidroelektrana tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 4 607 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 5 803,28 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iz hidroelektrana iznosi 3 800,4 GWh



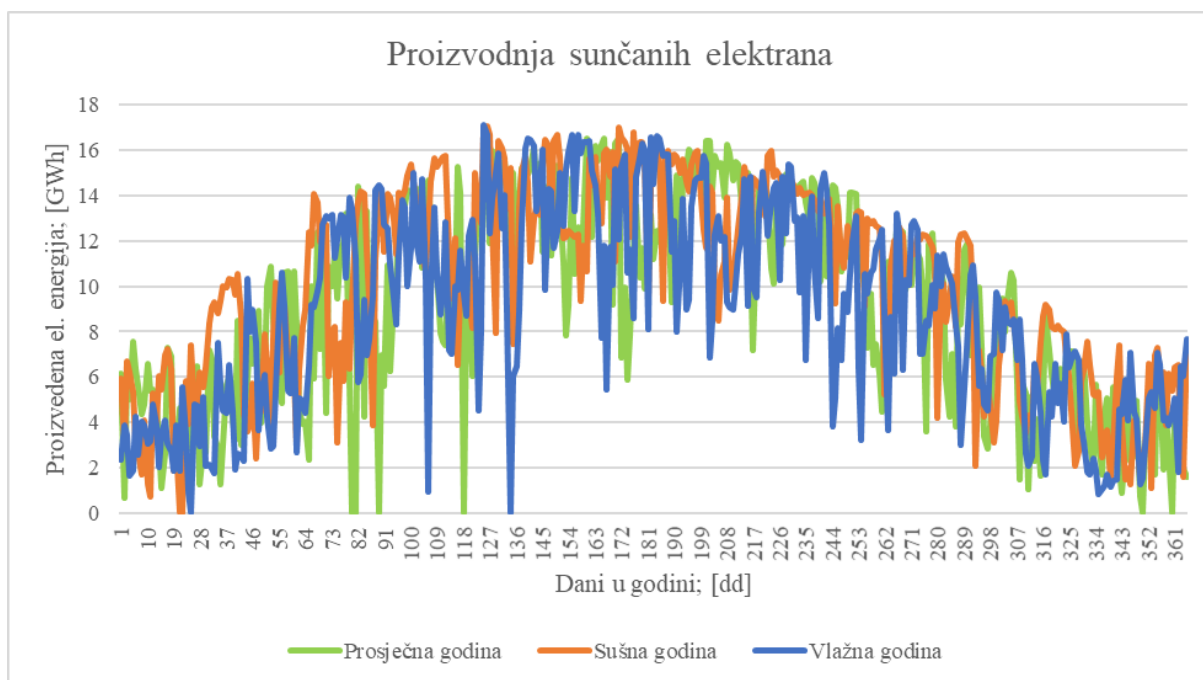
Slika 42 Proizvodnja hidroelektrana s obzirom na hidrološke uvjete – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S2

Na Slika 43 prikazana je proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja električne energije tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 3 542,6 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 3 199,6 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 3 340,4 GWh.



Slika 43 Proizvodnja vjetroelektrana – Dispa – SET MTHC model - 2050 - S2

Na Slika 44 prikazana je proizvodnja električne energije iz sunčanih elektrana tijekom godine, ukupna proizvodnja električne energije tijekom hidrološki prosječne godine iznosi 3 359 GWh, tijekom vlažne godine proizvodnja iznosi 3 256,75 GWh te tijekom sušne godine proizvodnja iznosi 3 682,5 GWh.



Slika 44 Proizvodnja sunčanih elektrana – Dispa – SET MTHC model – 2050 – S2

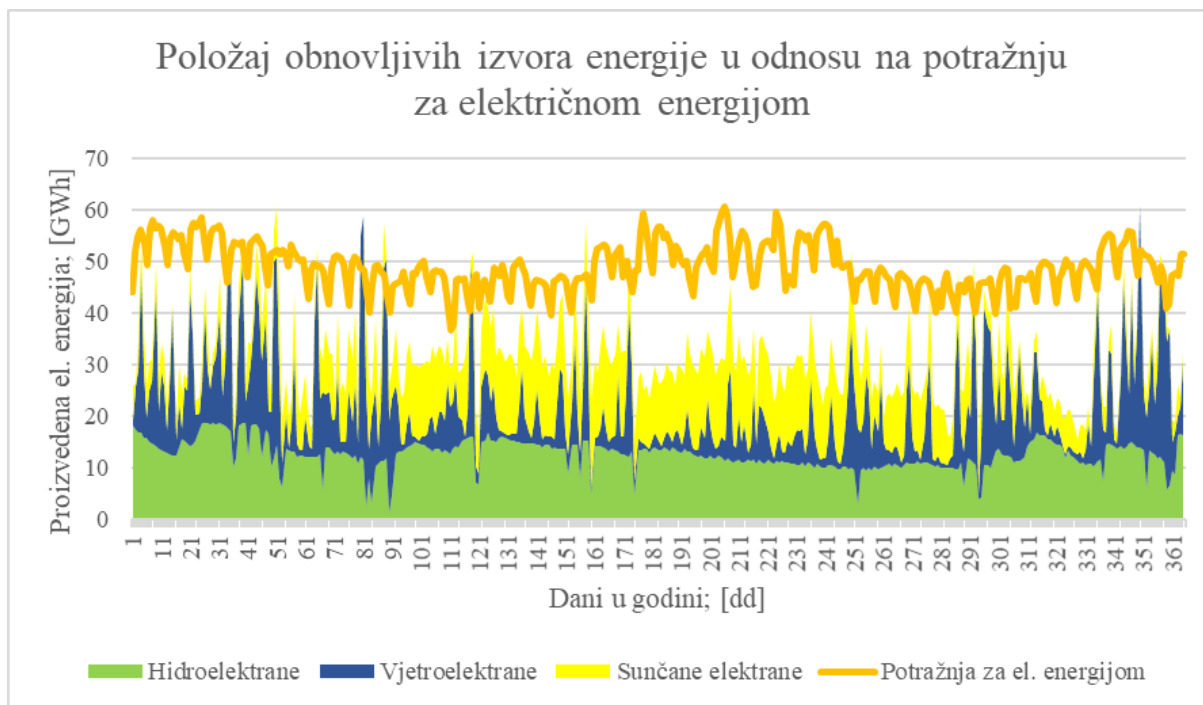
Iz Tablica 22 primjetno je kako vlažna godina ima najveću proizvodnju iz hidroelektrana te najmanju proizvodnju iz vjetroelektrana i sunčanih elektrana. S druge strane sušna godina ima najmanju proizvodnju iz hidroelektrana, dok ima najveću proizvodnju iz sunčanih elektrana. Prosječna godina ističe se najvećom proizvodnjom iz vjetroelektrana. Iz navedenog može se zaključiti kako je proizvodnja iz hidroelektrana te sunčanih elektrana povezana hidrometeorološkim uvjetima, tj. hidrološkim uvjetima te uvjetima osunčanosti, dok meteorološki uvjeti vjetra su nepredvidljivi te nisu jasno povezani s hidrološkim tipom godine.

Tablica 22 Pregled proizvodnje električne energije hidroelektrana, vjetroelektrana i sunčanih elektrana – 2050 – S2

Godina	Tip scenarija	Proizvodnja iz hidroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz hidroelektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
2030	S2	4607	5803	3800	-1196	21%	807	-21%
		Proizvodnja iz vjetroelektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz vjetroelektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		3543	3200	3340	343	-11%	202	-6%
		Proizvodnja iz sunčanih elektrana; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz sunčanih elektrana u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		3359	3257	3682	102	-3%	-323	9%
		Ukupna proizvodnja iz obnovljivih izvora energije; [GWh]			Usporedba proizvodnje iz obnovljivih izvora energije u odnosu na referentnu godinu			
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>		<i>Sušna godina</i>	
		11523	12260	10823	-736	6%	700	-6%

Na Slika 45 prikazan je položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom te se može zaključiti kako kapaciteti OIE planirani scenarijem S2 u 2050. godini mogu zadovoljiti potražnju za električnom energijom tijekom pojedinih dana u godini, no rjeđe nego što je slučaj u scenariju S1 za 2050. godinu. Ukupna godišnja potražnja za električnom energijom iznosi 18 893,3 GWh te ona nije u cijelosti zadovoljena proizvodnjom električne energije iz OIE. Proizvodnja električne energije iz OIE dobivena proračunom Dispa – SET MTHC modela iznosi 11 523 GWh, što predstavlja 61 % ukupne potražnje za električnom energijom. Razlika između potražnje i proizvodnje iz OIE može se nadomjestiti proizvodnjom iz drugih izvora energije poput prirodnog plina, bioplina, nuklearne

energije ili uvozom električne energije kako je predviđeno *Strategijom energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu*. [7], [56]



Slika 45 Položaj obnovljivih izvora energije u odnosu na potražnju za električnom energijom
– Dispa – SET – MTHC model – 2050 – S2 [56]

6.4. Sažetak dobivenih rezultata Dispa – SET MTHC modela

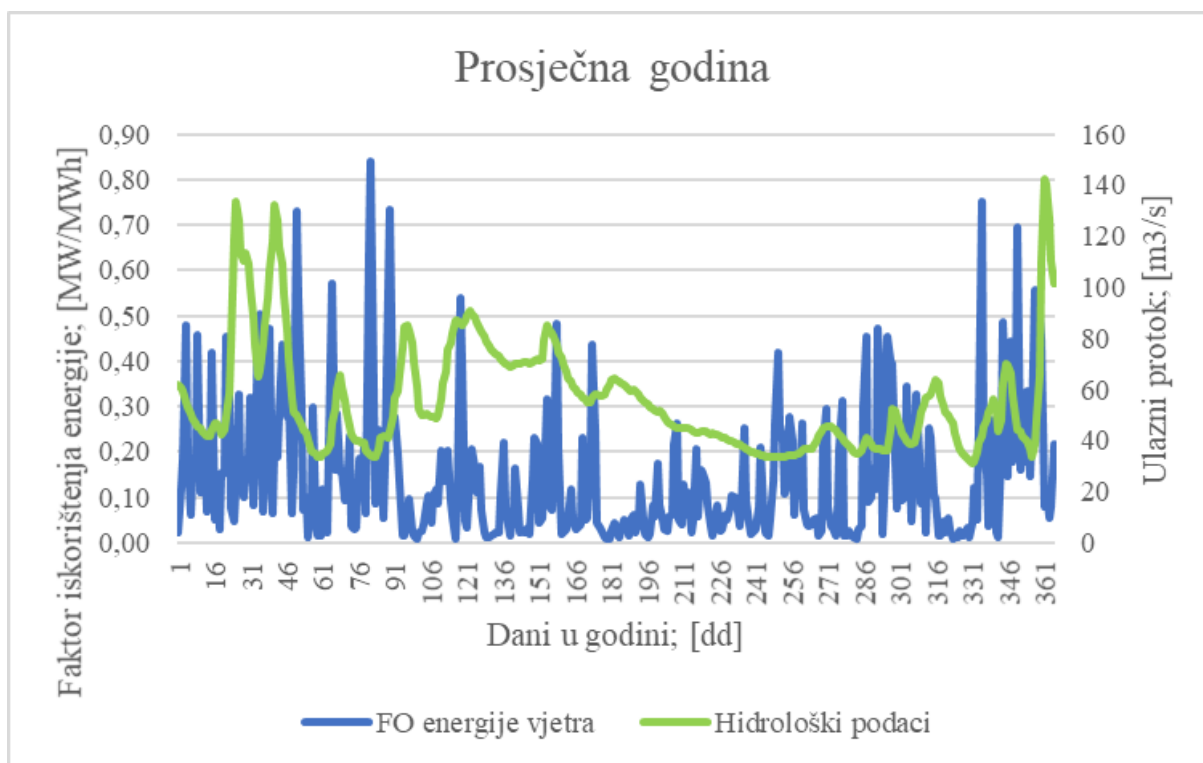
U Tablica 23 dan je pregled dobivenih rezultata proračunom Dispa – SET MTHC modela te je u nastavku dan komentar na njih.

Tablica 23 Pregled dobivenih rezultata Dispa - SET MTHC modela

Godina	Tip scenarija	Proizvodnja iz hidroelektrana; [GWh]		
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>
2019	Referentni scenarij	4801	6034	4005
2030	S1	4795	6038	4015
	S2	4801	6037	4007
2050	S1	4177	5338	3574
	S2	4607	5803	3800
Godina	Tip scenarija	Proizvodnja iz vjetroelektrana; [GWh]		
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>
2019	Referentni scenarij	1015	898	950
2030	S1	2057	1845	1925
	S2	1748	1569	1636
2050	S1	4541	4302	4142
	S2	3543	3340	3200
Godina	Tip scenarija	Proizvodnja iz sunčanih elektrana; [GWh]		
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>
2019	Referentni scenarij	106	103	116
2030	S1	1360	1283	1350
	S2	967	935	1054
2050	S1	4658	5464	4464
	S2	3359	3682	3257
Godina	Tip scenarija	Ukupna proizvodnja iz obnovljivih izvora energije; [GWh]		
		<i>Prosječna godina</i>	<i>Vlažna godina</i>	<i>Sušna godina</i>
2019	Referentni scenarij	5923	7035	5071
2030	S1	8161	9148	7365
	S2	7517	8540	6697
2050	S1	13376	13943	12882
	S2	11523	12260	10823

Uvidom u Tablica 23 primjetno je kako proizvodnja iz hidroelektrana opada do 2050. godine neovisno o tome kakvi hidrološki uvjeti u godini bili. Razloga za takav trend postoji više, a jedan od njih je veća primjena varijabilnih obnovljivih izvora energije poput vjetroelektrana te sunčanih elektrana. Profil proizvodnje električne energije varijabilnih obnovljivih izvora energije ima stohastički karakter te će njima hidroelektrane biti potpora za osiguranje fleksibilnosti i stabilnosti sustava. Rastom instaliranih kapaciteta vjetroelektrana i sunčanih elektrana veća je proizvodnja električne energije, što za posljedicu ima krivulju

proizvodnje koja može iznimno varirati tijekom dana (Slika 30, Slika 33, Slika 37, Slika 41, Slika 45). Kako bi se stohastički karakter krivulje proizvodnje izgladio, hidroelektrane imaju ulogu održavanja fleksibilnosti, uravnoteženja i stabilnosti sustava. Takav rad hidroelektrana vidljiv je na Slika 30, Slika 33, Slika 37, Slika 41 te Slika 45 gdje prilikom veće proizvodnje iz vjetroelektrana ili sunčevih elektrana proizvodnja iz hidroelektrana se smanjuje što govori i o povezanosti hidrometeoroloških uvjeta, tj. hidroloških uvjeta, uvjeta vjetra i osunčanosti, te kakav oni imaju utjecaj na rad hidroelektrana. Utjecaj povezanosti hidrometeoroloških uvjeta uočljiv je usporedbom Slika 30, Slika 33, Slika 37, Slika 41 te Slika 45 sa Slika 46. [79], [80]

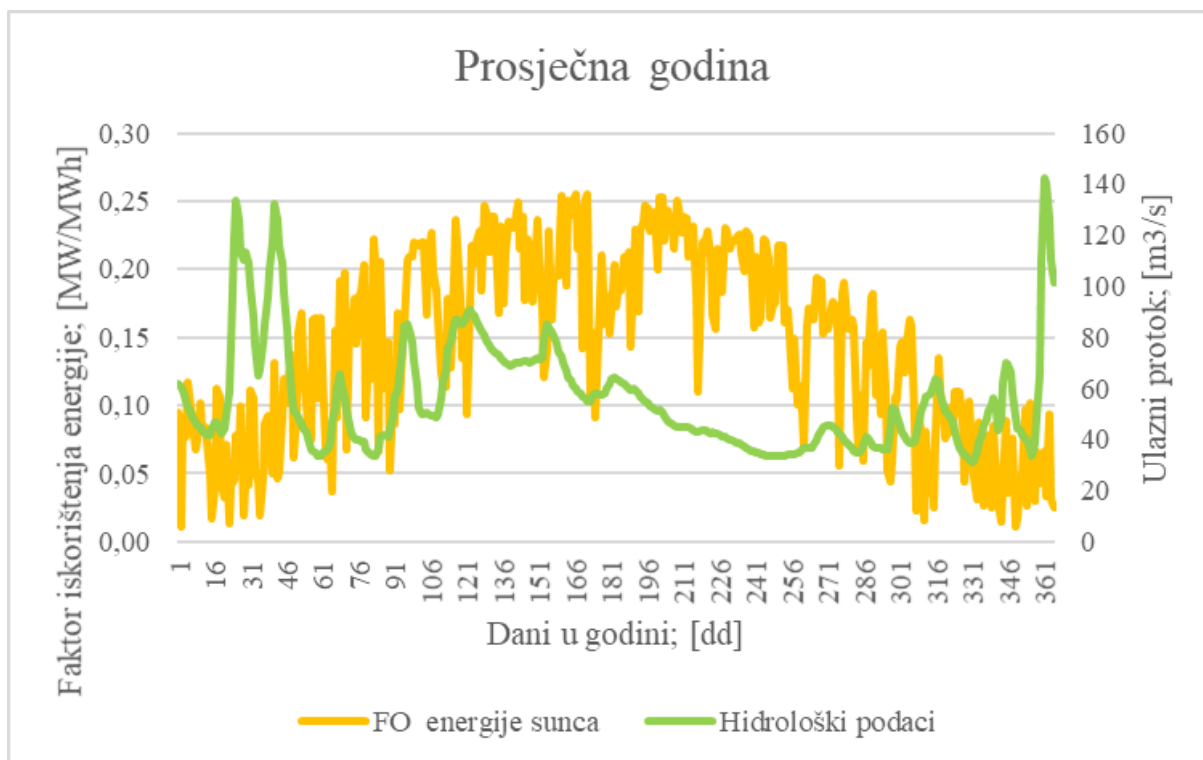


Slika 46 Profil faktora opterećenja energije vjetra i hidroloških podataka - prosječna godina [64], [70]

Periodi u godini koji su hidrološki bogatiji poklapaju se s periodima u godini koji su optimalni za proizvodnju električne energije iz vjetra. Budući da je profil proizvodnje energije iz vjetra izraženijeg stohastičkog karaktera hidroelektrane omogućuju stabilizaciju tog stohastičkog profila.

Profili opterećenja sunčeve energije i ulaznih hidroloških podataka su drugačijeg karaktera te se optimalni periodi proizvodnje iz sunčanih elektrana ne poklapaju s optimalnim periodima proizvodnje hidroelektrana i vjetroelektrana. Naime period optimalne proizvodnje iz sunčanih elektrana je ljeti zbog visoke osunčanosti, dok su tad hidrološki uvjeti i faktor opterećenja

energije vjetra lošiji što je vidljivo na Slika 47. Time sunčane elektrane nude kompenzaciju proizvodnji hidroelektrana i vjetroelektrana ljeti kad je proizvodnja iz njih manja. [80]



Slika 47 Profil faktora opterećenja energije sunca i hidroloških podataka - prosječna godina [64], [70]

U konačnici proizvodnja iz obnovljivih izvora energije raste i zauzima veći udio u proizvodnji električne energije, no potrebno je napomenuti da taj udio u budućnosti može biti nešto drugačiji zbog nepoznate krivulje potražnje za električnom energijom kao i ukupne godišnje potražnje za električnom energijom što uvelike ovisi o dinamici implementacije mjera energetske učinkovitosti te elektrifikacije transportnih usluga te usluga toplinarstva.

Dobiveni rezultati su u skladu sa *Strategijom energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050.* gdje se očekuje pad udjela u proizvodnje električne energije iz hidroelektrana u 2030. te 2050. godini unatoč gradnji novih kapaciteta kao što je i prikazano na Slika 19 i Slika 20. [7] Obnovljivi izvori energije prema *Strategiji* trebaju potporu drugih izvora energije čiji su profili proizvodnje ujednačenog karaktera kao što su elektrane na prirodni plin, bioplin, nuklearnu energiju i biomasu te takav prijenosni sustav koji osigurava uvoz i izvoz električne energije sa zemljama u okruženju. [7]

7. ZAKLJUČAK I PRIJEDLOG BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

U ovom diplomskom radu korištenjem Dispa – SET MTHC modela simulirana je proizvodnja hidroelektrana prilikom različitih hidrometeoroloških uvjeta te proizvodnja varijabilnih obnovljivih izvora energije, energije vjetra i energije sunca u Hrvatskoj pri različitim scenarijima. Scenariji su kreirani prema *Strategiji energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu* te se razlikuju dva scenarija: scenarij 1 i scenarij 2. Scenarij 1 predstavlja ubrzanu energetske tranziciju, dok scenarij 2 predstavlja scenarij umjerene energetske tranzicije. Scenariji su promatrani u 2030. godini i 2050. godini.

U Tablica 23 su prikazani dobiveni rezultati Dispa – SET MTHC modela prema kojima će udio proizvodnje električne energije iz varijabilnih obnovljivih izvora rasti, dok će udio proizvodnje iz hidroelektrana te sama količina proizvedene energije opadati. Prema scenariju 1 udio proizvodnje iz obnovljivih izvora energije u hidrološki prosječnoj 2030. godini biti će 43 %, a u 2050. godini 71 %. Udio proizvodnje električne energije iz hidroelektrana u referentnoj prosječnoj godini iznositi će 25 % te će do 2030. godine taj udio ostati nepromijenjen, dok će do 2050. godine opasti na 22 %. Udio proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana u referentnoj prosječnoj godini iznositi će 5 % te će rasti do 2030. godine na 11 %, a do 2050. godine udio će rasti do 24 %. Udio proizvodnje električne energije iz sunčanih elektrana u referentnoj prosječnoj godini iznositi će 1 % te će rasti do 2030. godine na 7 %, a do 2050. godine udio će rasti na 25 %. U scenariju 2 udio proizvodnje iz obnovljivih izvora energije u hidrološki prosječnoj godini 2030. godini biti će 40 %, a u 2050. godini 43 %. Udio proizvodnje električne energije iz hidroelektrana u referentnoj prosječnoj godini iznositi će 25 % te će do 2030. godine taj udio ostati nepromijenjen, dok će do 2050. godine opasti na 24 %. Udio proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana u referentnoj prosječnoj godini iznositi će 5 % te će rasti do 2030. godine na 9 %, a do 2050. godine udio će rasti do 19 %. Udio proizvodnje električne energije iz sunčanih elektrana u referentnoj prosječnoj godini iznositi 1 % te će rasti do 2030. godine na 5 %, a do 2050. godine udio će rasti na 18 %. Usporedbom dobivenih rezultat s očekivanim rezultatima *Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu* danima u Tablica 6 može se reći da su rezultati, tj. trend rezultata u skladu s očekivanjima *Strategije*, no uz iznimku da su udijeli obnovljivih izvora energije dobiveni Dispa – SET MTHC modelom manji.

Analizom dobivenih izlaznih podataka Dispa – SET MTHC modela ustanovljeno je da će hidroelektrane u budućnosti imati važnu ulogu u održavanju fleksibilnosti, uravnoteženju i

stabilnosti elektroenergetskih sustava uslijed instaliranja većih kapaciteta varijabilnih obnovljivih izvora energija. Unatoč tome, količina proizvedene električne energije iz hidroelektrana će opadati do 2030. te će se taj trend nastaviti i do 2050. godine. Tome je potrebno dodati i činjenicu da su reverzibilne hidroelektrane pouzdan i efikasan sustav pohrane energije obnovljivih izvora energije te će u budućnosti hidroelektrane imati važnu ulogu upravo na tom području energetike. [81], [82]

Prilikom analize podataka uočena je veza hidrometeoroloških uvjeta s proizvodnjom električne energije iz obnovljivih izvora energije. Tijekom hidrološki vlažne godine što podrazumijeva veće količine oborina proizvodnja iz hidroelektrana će biti najveća dok će zbog manjeg osunčanosti proizvodnja iz sunčanih elektrana biti najmanja. U hidrološki sušnoj godini proizvodnja iz hidroelektrana je najmanja, dok je proizvodnja iz sunčanih elektrana najveća razlog tomu je veća osunčanost te manja količina oborina. Prosječna godina ističe se proizvodnjom iz vjetroelektrana te se može reći kako potencijal meteoroloških uvjeta vjetra nije vezan uz pojavu određenog tipa hidrološke godine.

U budućnosti je potrebno istražiti utjecaj hidroelektrana na elektro energetski sustav na nižoj prostornoj skali, primjerice: utjecaj na slivna područja na kojima se nalaze hidroelektrane te utjecaj hidroelektrana na lokalnu zajednicu, poljoprivredu i vodoopskrbu te time kvantificirati potražnju za vodom van elektroenergetskog sektora. Za buduća istraživanja predlaže se pronalaženje novih metoda i izvora hidroloških podataka te svođenje Dispa – SET MTHC modela s dnevne na satnu razinu.

LITERATURA

- [1] Hrvatski sabor, “Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu,” 2020. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_04_46_921.html (Datum pristupa: Lipanj 23, 2021).
- [2] I. International Energy Agency, “World Energy Outlook 2016 - Excerpt - Water-Energy Nexus,” 2017. [Online]. Dostupno na: www.iea.org/t&c/
- [3] C. Carmona-Moreno, C. Dondeynaz, and M. Biedler, “Position paper on water, energy, food, and ecosystems (WEFE) nexus and sustainable development goals (SDGS),” Luxembourg, 2019. doi: 10.2760/5295.
- [4] International Energy Agency, “Levelised Cost of Electricity Calculator.” <https://www.iea.org/articles/levelised-cost-of-electricity-calculator> (Datum pristupa: Travanj 24, 2021).
- [5] International Renewable Energy Agency, “RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES,” 2012. Datum pristupa: Travanj 25, 2021. [Online]. Dostupno na: www.irena.org/Publications
- [6] Hydro Review, “Hydropower remains the lowest - cost source of electricity globally.” <https://www.hydroreview.com/business-finance/hydropower-remains-the-lowest-cost-source-of-electricity-globally/#gref> (Datum pristupa: Svibanj 25, 2021).
- [7] Vlada Republike Hrvatske, “PRIJEDLOG STRATEGIJE ENERGETSKOG RAZVOJA REPUBLIKE HRVATSKE DO 2030. GODINE S POGLEDOM NA 2050. GODINU,” Zagreb, 2019.
- [8] E. Europska komisija, “Pariški sporazum o klimatskim promjenama,” 2015. https://hr.wikipedia.org/wiki/Pari%C5%A1ki_sporazum (Datum pristupa: Lipanj 22, 2021).
- [9] Det Norske Veritas, “The impact of COVID - 19 in the energy transition.” <https://www.dnv.com/energy-transition/impact-of-covid19-on-the-energy-transition.html> (Datum pristupa: Lipanj 23, 2021).
- [10] I. International Energy Agency, “Covid - 19 impact on electricity.” <https://www.iea.org/reports/covid-19-impact-on-electricity> (Datum pristupa: Svibanj 20, 2021).
- [11] OurWorldInData, “Energy access.” <https://ourworldindata.org/energy-access> (Datum pristupa: Svibanj 20, 2021).

-
- [12] OurWorldInData, "Energy production and consumption," 2021. <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption> (Datum pristupa: Lipanj 23, 2021).
- [13] European Parliament, "Energy Efficiency." <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/69/energy-efficiency> (Datum pristupa: Travanj 26, 2021).
- [14] L. J. J. Meijer, R. J. van der Ent, O. A. C. Hoes, H. Mondeel, K. E. R. Pramana, and N. C. van de Giesen, "World Hydropower Capacity Evaluation."
- [15] OurWorldInData, "Electricity mix," 2021. <https://ourworldindata.org/electricity-mix> (Datum pristupa: Svibanj 20, 2021).
- [16] M. Papić, "Utjecaj članstva u Europskoj Uniji na vanjsku trgovinu Republike Hrvatske," Split, 2018.
- [17] Energetski institut Hrvoje Požar, "Energija u Hrvatskoj 2019.," Zagreb, 2020. Datum pristupa:: Lipanj 30, 2021. [Online]. Dostupno na: <https://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/renewable-energy-intermittency-explained-challenges-solutions-and-opportunities/>
- [18] Hrvatske vode, *Strategija upravljanja vodama*, Prvo izdanje. Zagreb: Hrvatske vode, 2009.
- [19] Hrvatski sabor, *Zakon o vodama*. Zagreb: Hrvatski sabor, 2019. Datum pristupa:: Lipanj 23, 2021. [Online]. Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_07_66_1285.html
- [20] "Područje crnomorskog sliva u Hrvatskoj." <https://www.dinarskogorje.com/rijeka-crnomorskog-sliva-slijeva.html> (Datum pristupa: Lipanj 23, 2021).
- [21] "Rijeka Drava." <https://hr.wikipedia.org/wiki/Drava> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [22] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, *Drava, Hrvatska enciklopedija*. 2021. Datum pristupa:: Svibanj 24, 2021. [Online]. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=16202>
- [23] "Slivno područje rijeke Drave." <https://frisco-project.eu/hr/slivna-podrucja-rijeka/drava/> (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).
- [24] "Rijeke Hrvatske." <https://crorivers.com/popis-rijeka/> (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).
- [25] Grupa autora, *Hidroelektrane u Hrvatskoj*, Drugo izdanje. Zagreb: Hrvatska elektroprivreda d.d., 2020.

- [26] "Rijeka Kupa." <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kupa> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [27] "Sliv rijeke Kupe." <https://www.dinarskogorje.com/sliv-rijeke-kupe-kolpe.html> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [28] Hrvatske vode, "Rijeka Kupa." <https://www.voda.hr/hr/novosti/kupa-rijeka-tirkiznog-izvora-koja-izvire-u-nacionalnom-parku> (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).
- [29] "Slivna područja rijeka - rijeka Kupa." <https://frisco-project.eu/hr/slivna-podrucja-rijeka/kupa/> (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).
- [30] "Rijeke Jadranskog sliva." <https://www.dinarskogorje.com/rijeke-jadranskoga-sliva-slijeva.html> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [31] Hrvatske vode, "Rijeke jadranskog sliva." <https://www.voda.hr/hr/novosti/ljepotice-jadranskog-sliva-neretva-lika-zrmanja-krka-cetina> (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).
- [32] "Rijeka Rječina." <https://bs.wikipedia.org/wiki/Rje%C4%8Dina> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [33] O. prof. emer. dipl. ing. građ. Bonacci, M. dr. sc. dipl. ing. geol. Oštrić, and T. prof. emer. dipl. ing. građ. Roje-Bonacci, "Prilog hidrologiji krškog izvora Rječine," Zagreb, 2017.
- [34] "Akumulacijsko jezero Valići." [https://hr.wikipedia.org/wiki/Vali%C4%87i_\(akumulacija\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Vali%C4%87i_(akumulacija)) (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [35] "HE Rijeka." https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Rijeka (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [36] "Rijeka Lokvarka." [https://hr.wikipedia.org/wiki/Lokvarka_\(rijeka\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Lokvarka_(rijeka)) (Datum pristupa: Lipanj 22, 2021).
- [37] "Lokvarsko jezero." https://hr.wikipedia.org/wiki/Lokvarsko_jezero (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).
- [38] "Jezero Bajer." <https://hr.wikipedia.org/wiki/Bajer> (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).
- [39] "Rijeka Ličanka." <https://hr.wikipedia.org/wiki/Li%C4%8Danka> (Datum pristupa: Lipanj 22, 2021).
- [40] "Rijeka Lika." [https://hr.wikipedia.org/wiki/Kru%C5%A1%C4%8Dica_\(jezero\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kru%C5%A1%C4%8Dica_(jezero)) (Datum pristupa: Lipanj 22, 2021).
- [41] "Sliv rijeke Gacke i Like." <http://www.vodovod-hrvatsko-primorje.hr/o-nama/> (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).

- [42] “Jezero Kruščica.” [https://hr.wikipedia.org/wiki/Kru%C5%A1%C4%8Dica_\(jezero\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kru%C5%A1%C4%8Dica_(jezero)) (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).
- [43] “Rijeka Gacka.” <https://bs.wikipedia.org/wiki/Gacka> (Datum pristupa: Lipanj 22, 2021).
- [44] “Sliv rijeke Neretve.” <https://www.dinarskogorje.com/hercegova269ki-slivovi.html> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [45] “Rijeka Neretva.” <https://bs.wikipedia.org/wiki/Neretva> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [46] prof. dr. sc. dipl. ing. građ. Vranješ Mijo, doc. dr. sc. dipl. ing. građ. Prskalo Maja, and mr. sc. dipl. ing. građ. Džeba Tatjana, “Hidrologija i hidrogeologija sliva Neretve i Trebišnjice, Osvrt na izgradnju dijela HE sustava - gornji horizonti,” *e-Zbornik*, 2013.
- [47] “Rijeka Trebišnjica.” <https://hr.wikipedia.org/wiki/Trebi%C5%A1njica> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [48] I. Lučić, “EKONOMSKA I EKOISTORIJA,” *Ekonomika i Ekohistorija*, pp. 14–28, 2012.
- [49] “Rijeka Cetina.” <http://www.visitsinj.com/hr/Vodic/47/rijeka-cetina> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [50] “Rijeke Dalmatinskog sliva.” <https://www.dinarskogorje.com/dalmatinski-slivovi.html> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [51] “Rijeka Cetina.” <https://croatianrivers.com/cetina/> (Datum pristupa: Svibanj 24, 2021).
- [52] “Rijeka Cetina - izgrađenost HE.” <https://hr.wikipedia.org/wiki/Cetina> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [53] “Rijeka Krka.” <https://hr.wikipedia.org/wiki/Krka> (Datum pristupa: Svibanj 23, 2021).
- [54] Energetski institut “‘Hrvoje Požar,’” *Program izgradnje malih hidroelektrana - mahe*, Prvo izdanje. Zagreb: Energetski institut “‘Hrvoje Požar,’” 1998.
- [55] Elektroprojekt d.d., “Studija utjecaja na okoliš - mHE Krčić 4,” Knin, 2017.
- [56] Transparency ENTSO - E, “<https://transparency.entsoe.eu/>.”
- [57] EuroStat, “Energy data 2020 edition.” doi: 10.2785/68334.
- [58] “Hrvatski operater prijenosnog sustava d.o.o. (HOPS).” <https://www.hops.hr/hrvatski-prijenosni-sustav> (Datum pristupa: Lipanj 23, 2021).
- [59] “HEP Proizvodnja d.o.o.” <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/1528> (Datum pristupa: Lipanj 22, 2021).
- [60] Elektroprojekt d.d., *Male hidroelektrane*, Prvo izdanje. Zagreb: Hrvatska elektroprivreda d.d., 2005.

- [61] Elektroprojekt d.d., “Studija utjecaja na okoliš HES Kosinj,” Zagreb, 2016. Datum pristupa: Lipanj 23, 2021. [Online]. Dostupno na: https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20--%20PUO/2017/studija_o_utjecaju_na_okolis_26.pdf
- [62] VITA PROJEKT d.o.o., “ELABORAT ZAŠTITE OKOLIŠA U POSTUPKU OCJENE O POTREBI PROCJENE UTJECAJA NA OKOLIŠ ZA ZAHVAT: REKONSTRUKCIJA HE SENJ,” Zagreb, 2017. [Online]. Dostupno na: www.vitaprojekt.hr
- [63] Z. A. von H. 4 Elektroprojekt d.d., “HE SENJ 2 - studija utjecaja na okoliš HE Senj 2 s kompenzacijskim bazenom Gusić polje 2,” 2012.
- [64] P. Burek, J. van der Knijff, and A. de Rod, “LISFLOOD Distributed Water Balance and Flood Simulation Model.”
- [65] DHMZ Hidrološka služba, “DHMZ Hidrološka služba.” <https://hidro.dhz.hr/> (Datum pristupa: Lipanj 22, 2021).
- [66] G. Stunjek, “UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE MASTER’S THESIS UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE Applying the Dispa-SET model to the analysis of the water-power nexus in the Western Balkans and neighbouring countries,” 2019.
- [67] J. Joint Research Centre and E. European Commision, “DispaSET - MTHC,” 2020. http://www.dispaset.eu/en/latest/mid_term.html (Datum pristupa: Lipanj 23, 2021).
- [68] “GAMS Dokumentacija.” <https://www.gams.com/latest/docs/> (Datum pristupa: Lipanj 23, 2021).
- [69] D. E. Felice, G. Aparicio, and T. Busch, “Analysis of the water-power nexus in the West African Power Pool Water-Energy-Food-Ecosystems project,” 2019. doi: 10.2760/362802.
- [70] “Renewables.ninja.” <https://www.renewables.ninja/> (Datum pristupa: Lipanj 23, 2021).
- [71] E. European Transmission System Operator, “Network Transfer Capacities (NTC) and Dostupno na Transfer Capacities (ATC) in the Internal Market of Electricity in Europe (IEM),” 2000.
- [72] D. Bajs and G. Majstorović, “Identification of Network Elements Critical for Increasing NTC Values in South East Europe,” Washington, DC, 2017.
- [73] Energetski institut “Hrvoje Požar,” “Enerija u Hrvatskoj 2009.,” Zagreb, 2010.

-
- [74] Energetski institut “‘Hrvoje Požar,’” “Energija u Hrvatskoj 2014.,” Zagreb, 2012.
- [75] Energetski institut “‘Hrvoje Požar,’” “Energija u Hrvatskoj 2011.,” Zagreb, 2012.
- [76] Energetski institut “‘Hrvoje Požar,’” “Energija u Hrvatskoj 2007.,” Zagreb, 2008.
- [77] Energetski institut “‘Hrvoje Požar,’” “Energija u Hrvatskoj 2010.,” Zagreb, 2011.
- [78] Energetski institut “‘Hrvoje Požar,’” “Energija u Hrvatskoj 2015.,” Zagreb, 2016.
- [79] Obnovljivi.com, “Značaj i vizija energije vodotoka u budućnosti.”
<https://www.obnovljivi.com/energija-vode/56-znacaj-i-vizija-energije-vodotoka-u-buducnosti?showall=1> (Datum pristupa: Lipanj 30, 2021).
- [80] Scientific American, “Renewable Energy Intermittency Explained: Challenges, Solutions and Opportunities.”
- [81] Office of Energy efficiency & Renewable energy, “Pumped - Storage Hydropower.”
<https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower> (Datum pristupa: Srpanj 01, 2021).
- [82] ArenaWire, “How could pumped hydro energy storage power our future?”
<https://arena.gov.au/blog/how-could-pumped-hydro-energy-storage-power-our-future/>
(Datum pristupa: Srpanj 01, 2021).

PRILOZI

I. CD-R disc