

Korištenje odziva potrošnje u svrhu povećanja integracije obnovljivih izvora energije pri planiranju razvoja energetskog sustava

Beljan, Doris

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:766548>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-11**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Doris Beljan

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Tomislav Pukšec

Student:

Doris Beljan

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Tomislavu Pukšecu na mentorstvu te Antunu Pfeiferu, mag. ing. mech na strpljivosti, stalnoj dostupnosti i savjetima prilikom izrade ovog završnog rada.

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

Naposljetku, hvala mojoj obitelji na razumijevanju i bezuvjetnoj podršci.

Doris Beljan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Doris Beljan** Mat. br.: 0035210136

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Korištenje odziva potrošnje u svrhu povećanja integracije obnovljivih izvora energije pri planiranju razvoja energetske sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Implementation of demand response to foster the integration of renewable energy sources in energy system development planning**

Opis zadatka:

Primjena odziva potrošnje važan je dio energetske tranzicije od energetske sustava temeljenog na fosilnim gorivima prema energetske sustavu temeljenom na varijabilnim obnovljivim izvorima energije (VOIE). Zadatak ovog rada je analizirati utjecaj primjene odziva potrošnje na mogućnost integracije energije iz VOIE u planiranju razvoja energetske sustava Bugarske. Potrebno je:

1. Prikazati načelni pregled pristupa odzivu potrošnje u energetske planiranju.
2. Analizirati i kvantificirati potencijal odziva potrošnje u svim sektorima potrošnje energije u Bugarskoj na dnevnoj, tjednoj i mjesečnoj bazi.
3. Modelirati referentni slučaj energetske sustava Bugarske u 2015. godini programom za energetske planiranje EnergyPLAN. Isti program koristiti za verifikaciju korištenih krivulja proizvodnje energije iz VOIE.
4. Koristeći scenarijsku satnu analizu, modelirati utjecaj odziva potrošnje na integraciju energije iz VOIE za nekoliko scenarija razvoja energetske sustava Bugarske. Analizu odraditi za 2030. i 2040. godinu.
5. Prikazati rezultate koji govore o smanjenju „kritičnog viška proizvedene električne energije“ [TWh/godišnje] u sustavu s visokim udjelom VOIE, uvozu energije [TWh/godišnje], izvozu energije [TWh/godišnje] te emisijama CO₂ [Mt].

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

Zadatak zadan:
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Tomislav Pukšec

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. METODE	3
3. OPIS STUDIJE SLUČAJA.....	6
4. DISTRIBUCIJSKE KRIVULJE	7
4.1. Izrada satnih distribucijskih krivulja energetskog sustava Bugarske.....	8
5. IZRADA SCENARIJA	13
5.1. Referentni scenarij za 2015. godinu.....	13
5.2. Osnovni BAU scenariji za 2030. i 2040. godinu	15
5.3. HighRES scenariji s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije za 2030. i 2040. godinu.....	16
6. POTENCIJAL ODZIVA POTROŠNJE U SVIM SEKTORIMA POTROŠNJE ENERGIJE U BUGARSKOJ.....	17
6.1. Struktura potrošnje električne energije u Bugarskoj.....	17
6.2. Analiza potencijala odziva potrošnje u Bugarskoj.....	20
7. REZULTATI.....	23
7.1. Analiza za slučaj zatvorenog sustava.....	27
8. ZAKLJUČAK	29
LITERATURA.....	30

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz pomicanja potrošnje radi uravnoteženja sustava [3]	2
Slika 2. EnergyPLAN shema [11]	3
Slika 3. Približan pregled instaliranih kapaciteta u Bugarskoj [18]	7
Slika 4. Satna distribucijska krivulja opterećenja elektroenergetskog sustava Bugarske za 2015. godinu	8
Slika 5. Satno toplinsko opterećenje CTS-a Bugarske za 2015. godinu	8
Slika 6. Satno toplinsko opterećenje individualnih sustava Bugarske za 2015. godinu	9
Slika 7. Satno rashladno opterećenje Bugarske za 2015. godinu	9
Slika 8. Distribucijska krivulja vjetroelektrana	10
Slika 9. Distribucijska krivulja dozračene energije za proizvodnju iz fotonaponskih elektrana Bugarske za 2015. godinu	10
Slika 10. Distribucijska krivulja dozračene energije za proizvodnju iz solarnih kolektora elektrana Bugarske za 2015. godinu.....	11
Slika 11. Distribucijska krivulja za nuklearnu elektranu Bugarske za 2015. godinu.....	11
Slika 12. Distribucijska krivulja za akumulacijske hidroelektrane Bugarske za 2015. godinu	12
Slika 13. Distribucijska krivulja za protočne hidroelektrane Bugarske za 2015. godinu	12
Slika 14. Instalirani kapaciteti Bugarske za 2015. godinu u MW	13
Slika 15. Konačna potrošnja energije po sektorima Bugarske za 2015. godinu u TWh	14
Slika 16. Instalirani kapaciteti VOIE u BAU i HighRES scenarijima	16
Slika 17. Potrošnja električne energije po sektorima za 2030. godinu	17
Slika 18. Potrošnja električne energije po sektorima potrošnje za 2040. godinu.....	17
Slika 19. Projekcija kretanja krajnje potrošnje u sektoru kućanstva do 2040. godine	18
Slika 20. Krajnja potrošnja električne energije u kućanstvima za 2030. godinu	18
Slika 21. Krajnja potrošnja električne energije u kućanstvima za 2040. godinu	19
Slika 22. Flexible demand opcije u EnergyPLAN-u [11]	20
Slika 23. Modeliranje odziva potrošnje u 2030. godini [11].....	22
Slika 24. Modeliranje odziva potrošnje u 2040. godini [11].....	22
Slika 25. Usporedba rezultata dobivenih iz svih scenarija	24
Slika 26. Usporedba scenarija s visokim udjelom VOIE s i bez odziva potrošnje	25
Slika 27. Ovisnost CEEP-a prema instaliranoj snazi VOIE za 2030. godinu	25
Slika 28. Ovisnost CEEP-a prema instaliranoj snazi VOIE za 2040. godinu	26

Slika 29. Ovisnost ukupne potrošnje energije bez OIE prema instaliranoj snazi VOIE za 2030. godinu	26
Slika 30. Ovisnost ukupne potrošnje energije bez OIE prema instaliranoj snazi VOIE za 2040. godinu	27
Slika 31. Ovisnost CEEP-a prema instaliranoj snazi VOIE za 2030. godinu u zatvorenom sustavu	27
Slika 32. Ovisnost CEEP-a prema instaliranoj snazi VOIE za 2040. godinu u zatvorenom sustavu	28
Slika 33. Usporedba rezultata za zatvoreni i otvoreni sustav	28

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba dobivenih i postojećih vrijednosti iz baza podataka za 2015. godinu... 14	14
Tablica 2. Konačna potrošnja po sektorima Bugarske u BAU scenarijima(TWh) 15	15
Tablica 3 Instalirani kapaciteti Bugarske u BAU scenarijima (MW) 15	15
Tablica 4. Potrošnja električne energije u industrijskim granama za Bugarsku 19	19
Tablica 5. Ukupni potencijal odziva potrošnje u Bugarskoj u 2030. i 2040. godini 21	21
Tablica 6. Usporedba rezultata dobivenih iz svih scenarija 23	23

POPIS OZNAKA

VOIE		varijabilni obnovljivi izvori energije
EU		Europska unija
CTS		centralizirani toplinski sustav
STP		satno toplinsko opterećenje
DD	°C	stupanj sat
T _p	°C	unutrašnja temperatura prostorije
T _v	°C	satna vanjska temperatura
THP	MWh	total heating production
TCP	MWh	total cooling production
SRP	MWh	satno rashladno opterećenje
TPES	TWh	total primary energy supply
NECP		National energy and climate plans
WEM		with existing policy measures
DOE		Department of Energy
PV		photovoltaic
MW		megawatt
TWh		terawatthours
OIE		obnovljivi izvori energije
CEEP	TWh/godini	critical excess electricity production
BAU		business as usual
OP		odziv potrošnje

SAŽETAK

U ovom radu analizirano je kako odziv potrošnje utječe na integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije u energetsom sustavu Bugarske. Analiza je napravljena u računalnom programu EnergyPLAN za scenarije za 2015., 2030. i 2040. godinu te su izrađene satne distribucijske krivulje koje simuliraju proizvodnju i potrošnju u energetsom sustavu kroz cijelu godinu. U procjeni razvoja energetskega sektora Bugarske korišten je Integrirani energetska i klimatski plan Republike Bugarske 2021-2030, koji je napravljen u sklopu NECP plana Europske unije. Za implementaciju odziva potrošnje, napravljena je analiza potrošnje električne energije po sektorima. U rezultatima je dan prikaz smanjenja emisija CO₂, ukupne potrošnje energije i kritičnog viška proizvodnje električne energije porastom udjela varijabilnih obnovljivih izvora energije i primjenom odziva potrošnje u energetsom sustavu.

Ključne riječi: odziv potrošnje, varijabilni obnovljivi izvori energije, EnergyPLAN, CEEP, energetska sustav, NECP

SUMMARY

This paper analyzes how demand response affects the integration of variable renewable energy sources in the Bulgarian energy system. The analysis was made in computer program EnergyPLAN for scenarios for 2015, 2030 and 2040. Hourly distribution curves were made, which simulate production and consumption in the energy system throughout the year. In evaluation of development for Bulgaria's energy sector, Integrated energy and climate plan of the Republic of Bulgaria 2021-2030 was used, which was made as part of NECP European union plan. To implement demand response, an analysis of electricity consumption by sectors was made. The results show reduction in CO₂ emissions, total primary energy supply and critical excess electricity production by increasing the share of variable renewable energy sources and applying demand response in energy system.

Key words: demand response, variable renewable energy sources, EnergyPLAN, CEEP, energy system, NECP

1. UVOD

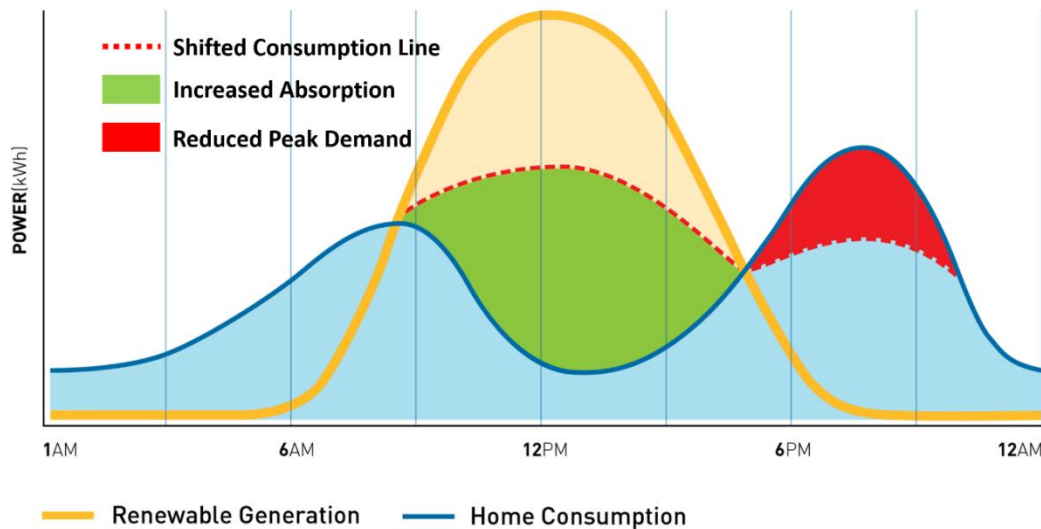
Energija iz vjetra i sunca, odnosno varijabilni obnovljivi izvori energije (VOIE), zbog vlastite promjenjive proizvodnje predstavljaju izazov u planiranju budućih energetske sustava baziranih na obnovljivim izvorima energije. Takvi sustavi traže bolje balansiranje proizvodnje i potrošnje te prelazak iz sustava gdje proizvodnja prati potrošnju u sustav gdje potrošnja djelomično prati promjenjivu proizvodnju. Tehnologije odziva potrošnje mogu pružiti brzo uravnoteženje sustava u zadanom vremenskom okviru te se time prilagoditi proizvodnji iz VOIE.

Odziv potrošnje, engl. demand response, prema US Department of Energy (DOE) definirana je kao „promjene u potrošnji električne energije kod krajnjih kupaca u odnosu na njihove uobičajene obrasce potrošnje, kao odgovor na promjene u cijeni električne energije tijekom vremena ili na poticajne isplate namijenjene poticanju niže potrošnje električne energije u vrijeme visoke veleprodajne tržišne cijene ili kada je ugrožena pouzdanost sustava“ [1].

Odziv potrošnje pruža priliku potrošačima da odigraju značajnu ulogu u radu električne mreže, smanjujući ili prebacujući potrošnju tijekom perioda vršnog opterećenja, što predstavlja mogućnost potrošačima da sudjeluju na tržištu. Prema [2], „demand response“ može se kategorizirati u dvije grupe:

- „Explicit Demand Response“ – eksplicitni odziv potrošnje
- „Implicit Demand Response“ – implicitni odziv potrošnje

Eksplicitnim načinom potrošnja se, kroz balansiranje, na tržištu izravno natječe s opskrbom kroz usluge agregata i pojedinačnih velikih potrošača. Implicitni ne dozvoljava sudjelovanje na tržištu, već potrošač izabire biti izložen vremenski promjenjivim cijenama električne energije i/ili tarifama mreže.



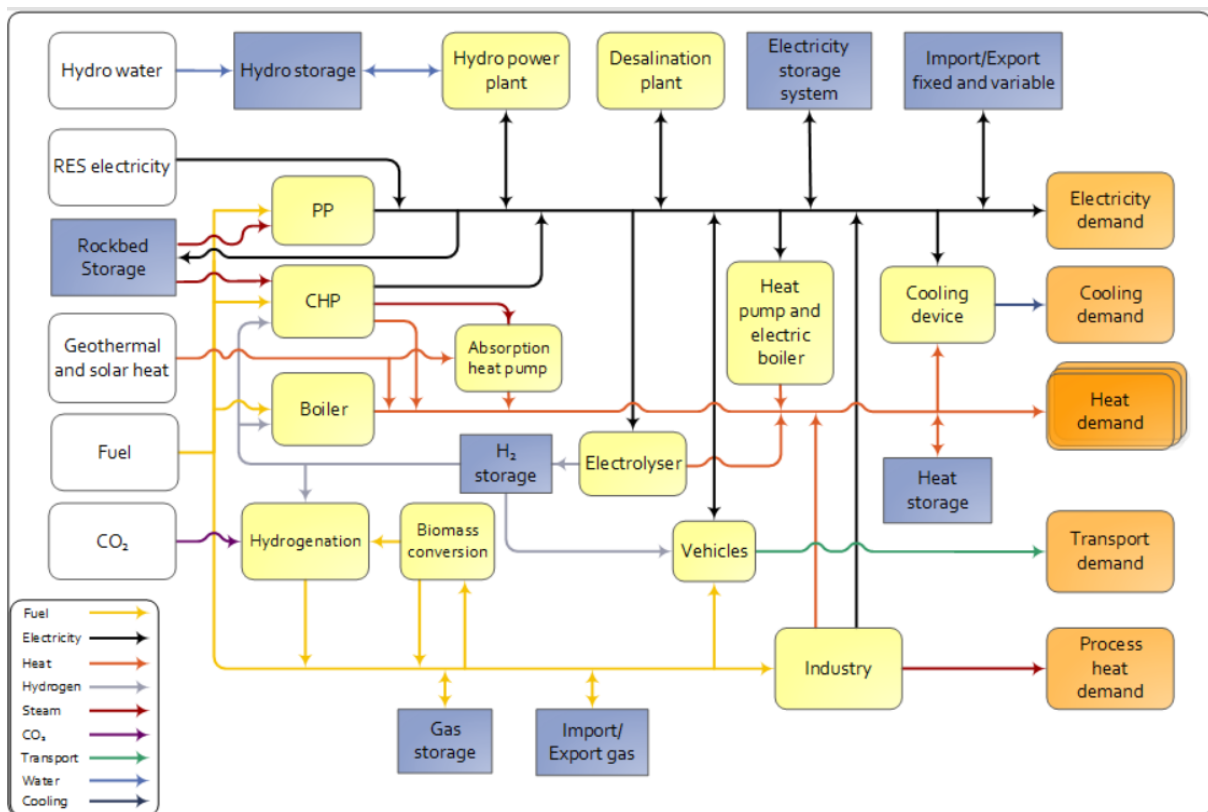
Slika 1. Prikaz pomicanja potrošnje radi uravnoteženja sustava [3]

Tijekom planiranja energetske sustava mora se osigurati pokrivanje vršnog opterećenja. Primjenom tehnologija odziva potrošnje može se smanjiti i ograničiti upotreba vršnih elektrana, koje rade samo mali broj sati tijekom godine i imaju velike troškove. U narednim godinama očekuje se rast potrošnje [4] što predstavlja veliki rizik od preopterećenja trenutnih kapaciteta mreže budući da su oni dimenzionirani da zadovolje vršno opterećenje. Primjenom tehnologija odziva potrošnje ukupna potrošnja se ne smanjuje, ali moguća je redistribucija i bolja raspodjela opterećenja, što dovodi do smanjena ukupno instaliranih proizvodnih kapaciteta i odgađanja povećanja kapaciteta mreže [5].

Implementacija odziva potrošnje zahtjeva modernizaciju elektroenergetske mreže i razvoj infrastrukture. Budući energetske sustavi moraju obuhvatiti i poticati sudjelovanje potrošača u novim pametnim metodama potrošnje energije u kojim bi potrošnja pratila proizvodnju. U mnogim radovima su proučene razne tehnologije fleksibilizacije sustava pa je tako u [6] pokazano kako pametni sustavi skladištenja energije utječu na integraciju VOIE. Tehnologije odziva potrošnje (power-to-heat i vehicle-to-grid) koristile su se za integraciju solarnih fotonaponskih elektrana u [7]. U [8] je, na vehicle-to-grid konceptu, prikazan energetske sustav otoka koji je baziran samo na varijabilnim obnovljivim izvorima energije u kombinaciji s električnim skladištenjem u obliku stacionarnih i pokretnih baterija, odnosno vozila koja su povezana na mrežu te punjenjem i pražnjenjem sudjeluju u sustavu. U [9] se analizira integracija krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom električne i toplinske energije u postojećem energetske sustav, tzv. prosumeri. Ovim radom će se analizirati kako na integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije utječe odziv potrošnje, tako da se potrošnja po sektorima učini fleksibilna, tj. da se pomiče na dnevnoj ili tjednoj bazi.

2. METODE

Prilikom izrade scenarija energetskeg sustava Bugarske, koristit će se računalni program EnergyPLAN. Razvijen je na Sveučilištu u Aalborgu u Danskoj, kao alat u energetske planiranju nacionalnih energetskeg sustava, no primjenjiv je i na manje sustave provodeći tehničke i ekonomske analize. Program predstavlja ulazno/izlazni model, pri čemu osnovne ulazne podatke čine energetska potrošnja, instalirana snaga postrojenja te troškovi i cijene, dok izlazni podaci uključuju energetske bilancu odnosno pripadajuću godišnju proizvodnju i potrošnju energije, potrošnju goriva, uvoz odnosno izvoz te ukupne emisije CO₂ [10].



Slika 2. EnergyPLAN shema [11]

EnergyPLAN-om će se provesti scenarijska analiza razvoja energetskeg sustava da bi se proučilo kako odziv potrošnje utječe na integraciju VOIE. Potrebno je izraditi 5 scenarija, prvi na temelju stvarnih podataka za referentnu godinu. U program se unose podaci potrošnje po sektorima, podaci proizvodnje iz različitih tehnologija proizvodnje energije i distribucijske krivulje koje opisuju potrošnju i proizvodnju u energetskeg sustavu te godine. Scenarijska

analiza za osnovne scenarije napravljena je prema modelu „business as usual“. Ti scenariji predstavljaju očekivani razvoj energetskeg sustava prema trenutno donesenim strategijama i direktivama. Zatim je potrebno napraviti „HighRES“ scenarije u kojima je pretpostavljen razvoj s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije, a s istom potrošnjom kao i u osnovnim scenarijima. Proučit će se kakav utjecaj povećanje kapaciteta fotonaponskih elektrana i vjetroelektrana ima na sustav, s i bez korištenja odziva potrošnje, odnosno utjecaj na promjenu kritičnog viška proizvodnje električne energije, uvoza, izvoza i emisija CO₂.

Za analizu sustava u EnergyPLAN-u potrebno je izraditi satne distribucijske krivulje od 8784 vremenska koraka. Krivulje su napravljene prema podacima dobivenih iz ENTSO-E [12] te iz programa METEONORM koji sadrži opsežnu meteorološku bazu podataka, ali je ujedno i računalni program za meteorološke proračune željene lokacije [13]. Potrebno toplinsko i rashladno opterećenje oblikovno je na satnoj razini:

Satno toplinsko opterećenje CTS-a računa se prema jednadžbi (1),

$$STP = \left(\frac{THP}{\sum_1^{8784} DD} \right) * DD \quad (1)$$

a stupanj sat prema jednadžbi (2) samo u slučaju kada je vanjska temperatura niža od 16°C, a u ostalim slučajevima DD jednak je nuli. Također u periodu od 1.5. do 1.10. DD mora biti jednak nuli.

$$DD = T_p - T_v \quad (2)$$

Dobivena krivulja je modificirana tako da CTS radi samo u periodu od 5 do 23 sata te je pridodana potrošnja tople vode koja iznosi 20% ukupnog toplinskog opterećenja.

Satno toplinsko opterećenje individualnih sustava računa se prema jednadžbi (3),

$$STP = \left(\frac{THP}{\sum_1^{8784} DD} \right) * DD \quad (3)$$

a stupanj sat prema jednadžbi (2) samo u slučaju kada je vanjska temperatura niža od 16°C, a u ostalim slučajevima DD jednak je nuli. Također u periodu od 1.5. do 1.10. DD mora biti jednak nuli.

Dobivena krivulja je modificirana tako da se u periodu od 23 do 6 sati temperatura T_p smanji na 18°C te je pridodana potrošnja tople vode koja iznosi 20% ukupnog toplinskog opterećenja.

Satno rashladno opterećenje računa se prema jednadžbi (4),

$$SRP = \left(\frac{TCP}{\sum_1^{8784} DD} \right) * DD \quad (4)$$

a stupanj sat prema jednadžbi (5) samo u slučaju kada je vanjska temperatura viša od 26°C , a u ostalim slučajevima DD jednak je nuli. Također u periodu od 1.10. do 1.5. DD mora biti jednak nuli.

$$DD = T_v - T_p \quad (5)$$

3. OPIS STUDIJE SLUČAJA

Scenarijska analiza provest će se na primjeru Bugarske. Republika Bugarska zauzima istočni dio Balkanskog poluotoka u jugoistočnoj Europi. Okružena je Rumunjskom na sjeveru, Crnim morem na istoku, Turskom i Grčkom na jugu, Sjevernom Makedonijom na jugozapadu dok na zapadu graniči sa Srbijom [14]. U jugoistočnoj Europi jedna je od najvećih izvoznika električne energije s ukupno 14,83 TWh u 2015. godini [15].

Nuklearne i termoelektrane dominiraju strukturom izvora energije u Bugarskoj. U usporedbi s prosjekom Europske unije, Bugarska ima veći udio krutog goriva (34,1% u odnosu na 16,2%), kao i nuklearnog (20,5% u odnosu na 13,6%) te manji udio nafte i njenih derivata (21,6% u odnosu na 34,5%) i plinova (13,4% u odnosu na 22%). Udio obnovljivih izvora energije je 10,3%, što je otprilike slično europskom prosjeku od 12,9% [16].

Bugarska uvozi većinu naftnih derivata i prirodnog plina potrebnih za domaću potrošnju. U 2015. godini zavisnost o neto uvozu naftnih derivata, prirodnog plina i kamenog ugljena iznosila je redom 100%, 97% i 94,9%, većinom iz tradicionalno jedinog trgovinskog partnera - Ruske Federacije. Jedini pravac dobave ruskog plina je Ukrajina. Također, Ruska Federacija je jedini dobavljač nuklearnog goriva koji čini 31,3% proizvedene električne energije u Bugarskoj 2015. godine [16]. Iako je sveukupna zavisnost o uvozu energenata Bugarske ispod EU prosjeka, sve navedeno svrstava je u ranjivu skupinu, naročito prema poremećajima u opskrbi plinom.

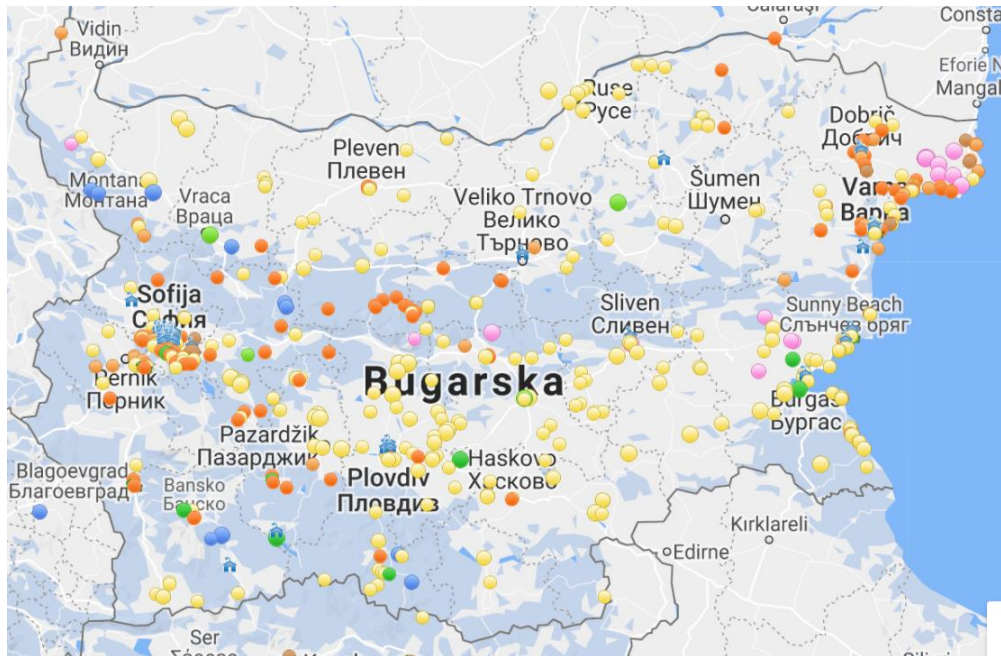
Bugarska je pristupila Europskoj uniji 1. siječnja 2007. godine. Kao i ostale države članice, donijela je nacionalnu energetska strategiju kako bi držala korak s europskom energetska politikom i globalnim trendovima razvoja. Iz energetske strategije Bugarske do 2020. godine [17] može se izdvojiti 5 značajnih tema koje će oblikovati daljnje procedure:

- energetska sigurnost
- smanjenje emisija CO₂
- povećanje udjela obnovljivih izvora energije u ukupnoj konačnoj potrošnji energije
- poboljšanje energetske učinkovitosti
- neovisno regulirano i konkurentno energetska tržište

Kako bi se smanjile emisije CO₂, raste pozornost za obnovljive izvore energije kao alternativa fosilnom gorivu. Međutim, za integraciju OIE nužno je osigurati fleksibilnost energetska sustava kako bi se prilagodio promjenljivoj proizvodnji.

4. DISTRIBUCIJSKE KRIVULJE

Budući da je model izrađen za cijeli energetski sustav Bugarske, odabrane su reprezentativne lokacije s trenutno najviše instaliranih kapaciteta kao i lokacije koje će geografski pokriti traženo područje.



Slika 3. Približan pregled instaliranih kapaciteta u Bugarskoj [18]

- | | |
|------------------------------|-------------------|
| ● fotonaponske elektrane | ● vjetroelektrane |
| ● solarni termalni kolektori | ● hidroelektrane |

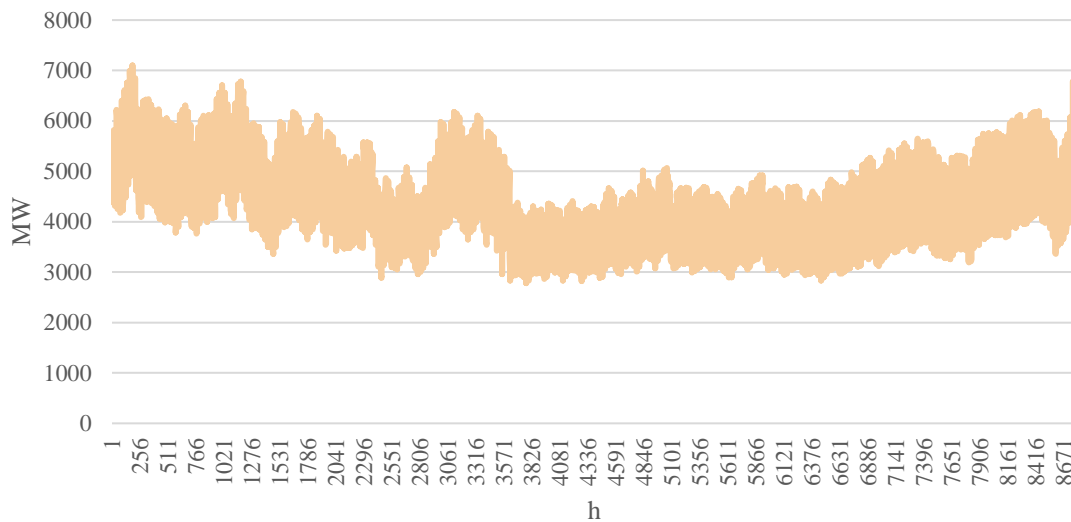
Za 15 lokacija iz METEONORM-a [18] su prikupljeni satni podaci za:

- sunčevo zračenje
- temperaturu zraka
- brzinu vjetra
- količinu padalina
-

Ovisno o vrsti satnih krivulja, koje predstavljaju ulazne podatke za izradu modela u EnergyPLAN-u, odabrane su relevantne lokacije te su iz prikupljenih podataka izrađene distribucijske krivulje koje predstavljaju njihovu srednju vrijednost.

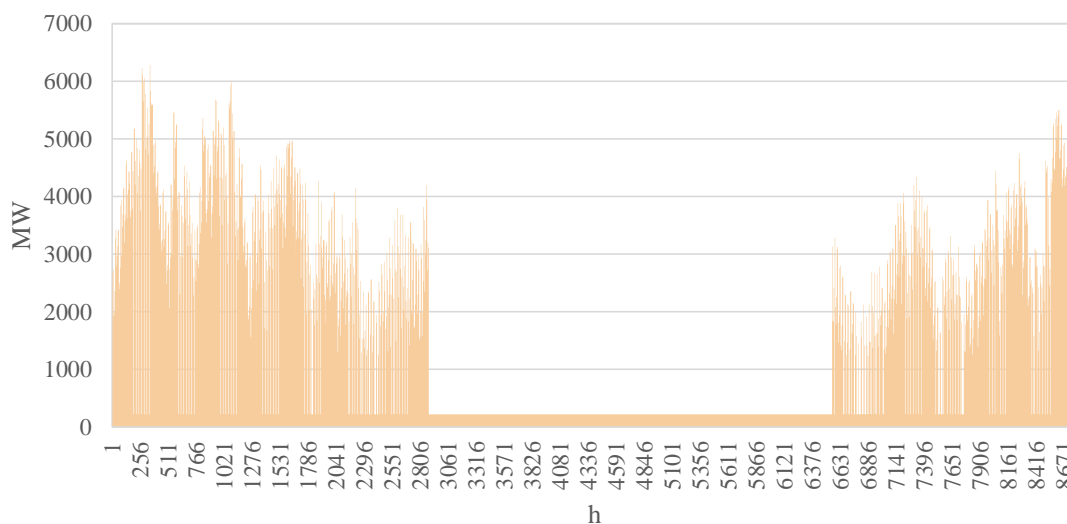
4.1. Izrada satnih distribucijskih krivulja energetskog sustava Bugarske

Satna krivulja opterećenja elektroenergetskog sustava dobivena je prema podacima ENTSO-E [13] te je prikazano na Slici 4.



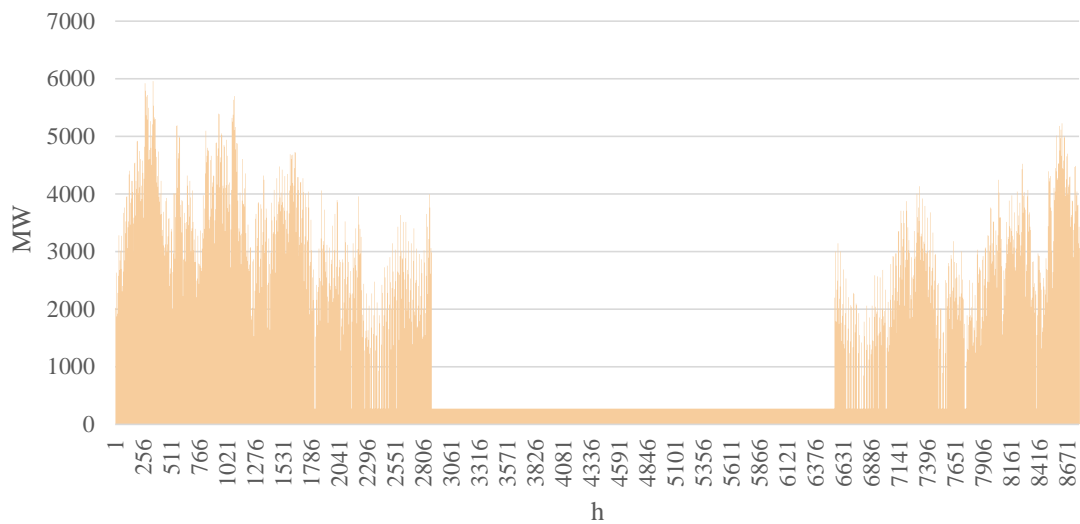
Slika 4. Satna distribucijska krivulja opterećenja elektroenergetskog sustava Bugarske za 2015. godinu

Satno toplinsko opterećenje dobiveno je koristeći jednadžbu (1) i podatke iz METEONORM-a za gradove u kojima je prisutan centralizirani toplinski sustav. Krivulja je prikazana na Slici 5.



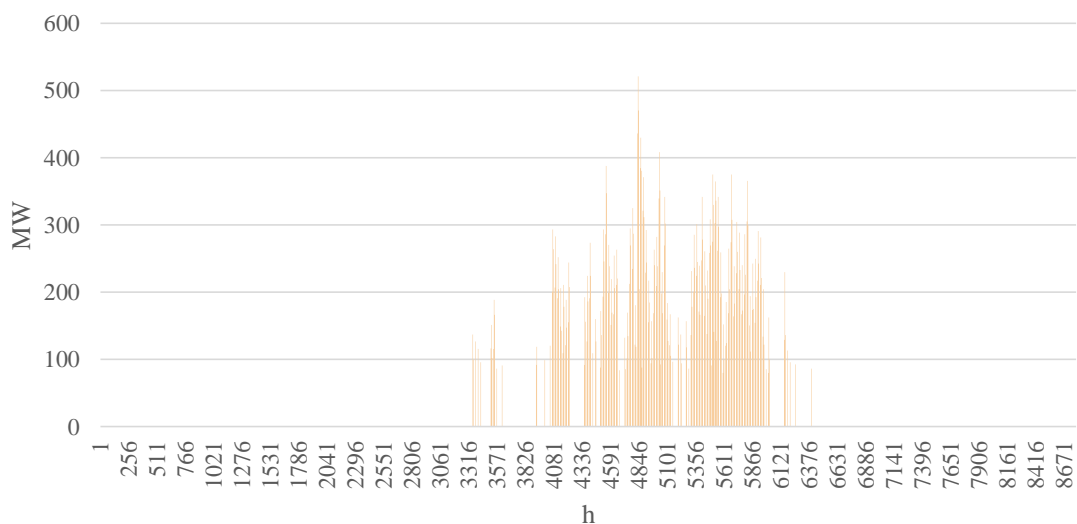
Slika 5. Satno toplinsko opterećenje CTS-a Bugarske za 2015. godinu

Koristeći jednadžbu (3) i podatke iz METEONORM-a dobiveno je satno toplinsko opterećenje individualnih sustava i prikazano je na Slici 6.



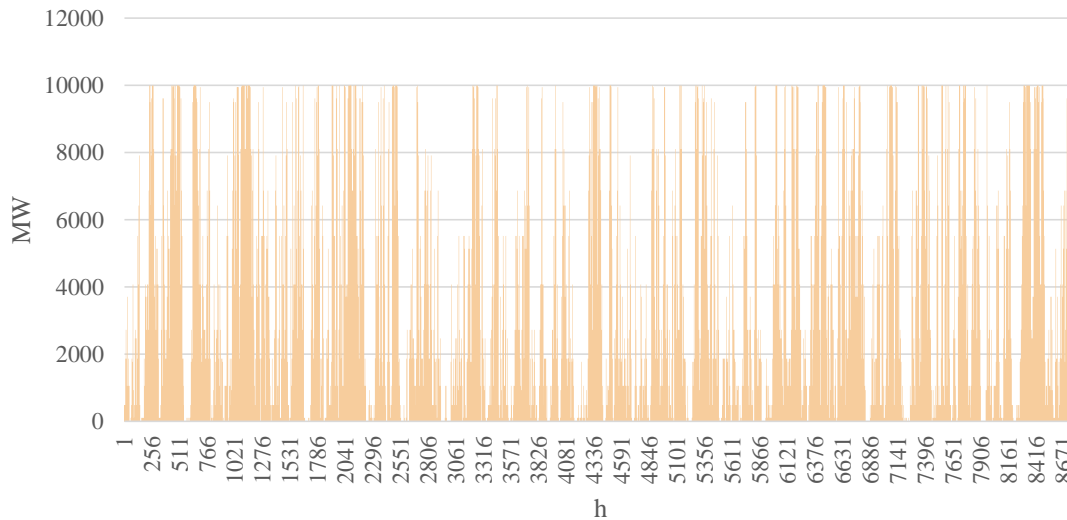
Slika 6. Satno toplinsko opterećenje individualnih sustava Bugarske za 2015. godinu

Također, iz podataka dobivenih iz METEONORM-a i jednadžbe (4) dobivena je krivulja rashladnog opterećenja na Slici 7.



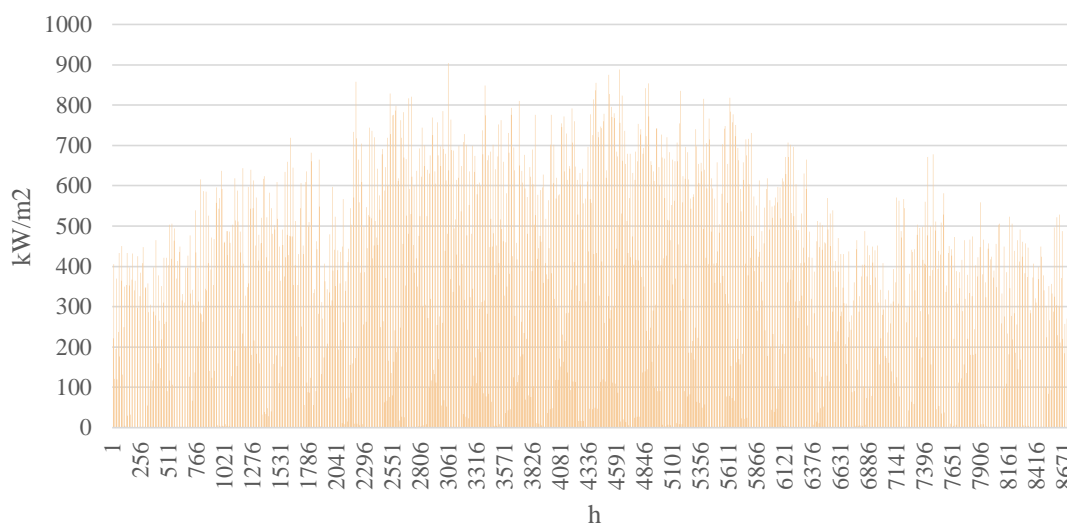
Slika 7. Satno rashladno opterećenje Bugarske za 2015. godinu

Distribucijska krivulja proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana izrađena je prema referentnom modelu snage 10 MW, uz podatke o brzini vjetra dobivenih iz METEONORM-a. Koristile su se 2 turbine snage 3 MW, jedna snage 2 MW i dvije vjetroturbine snage 1 MW.



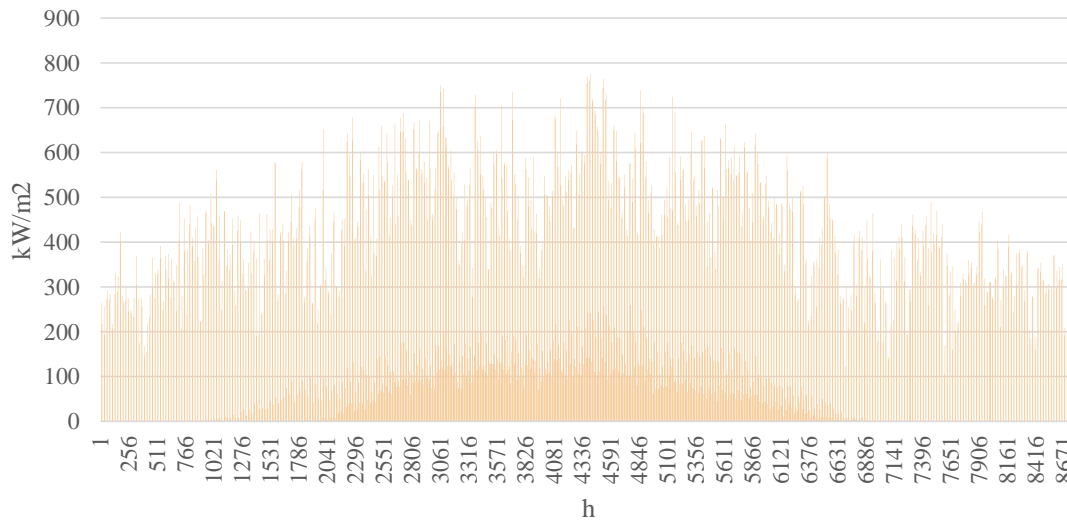
Slika 8. Distribucijska krivulja vjetroelektrana

Satna krivulja zračenja za proizvodnju iz fotonaponskih elektrana, na Slici 9., je izrađena tako što je uzeta srednja vrijednost od krivulje za satno globalno zračenje na horizontalnu plohu i satno globalno zračenje na plohu pod optimalnim kutom zračenja.



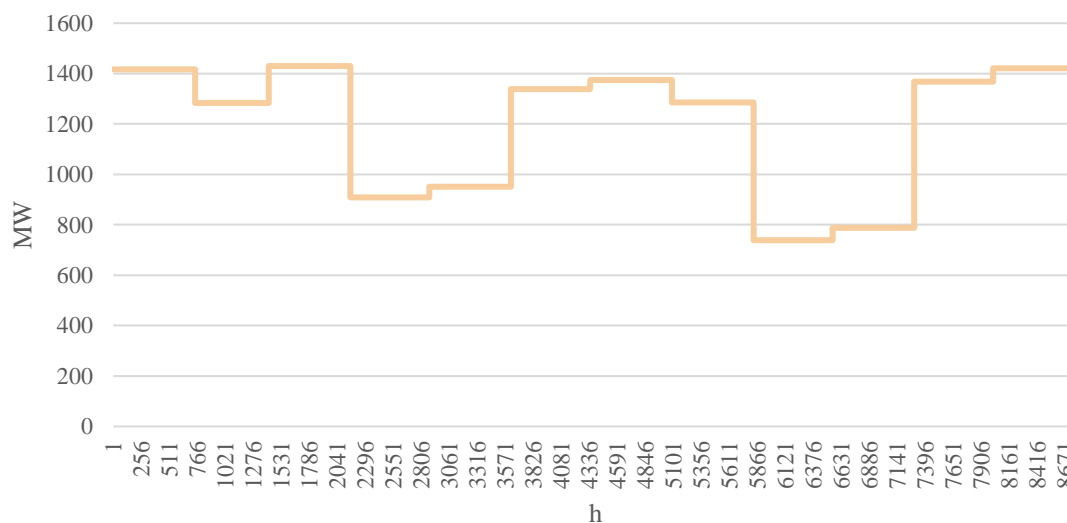
Slika 9. Distribucijska krivulja dozračene energije za proizvodnju iz fotonaponskih elektrana Bugarske za 2015. godinu

Satna krivulja zračenja za proizvodnju iz solarnih termalnih kolektora je izrađena tako da je izračunata proizvodnja od 60% za satno globalno zračenje na plohu pod optimalnim kutom i 40% za satno globalno zračenje na horizontalnu plohu.



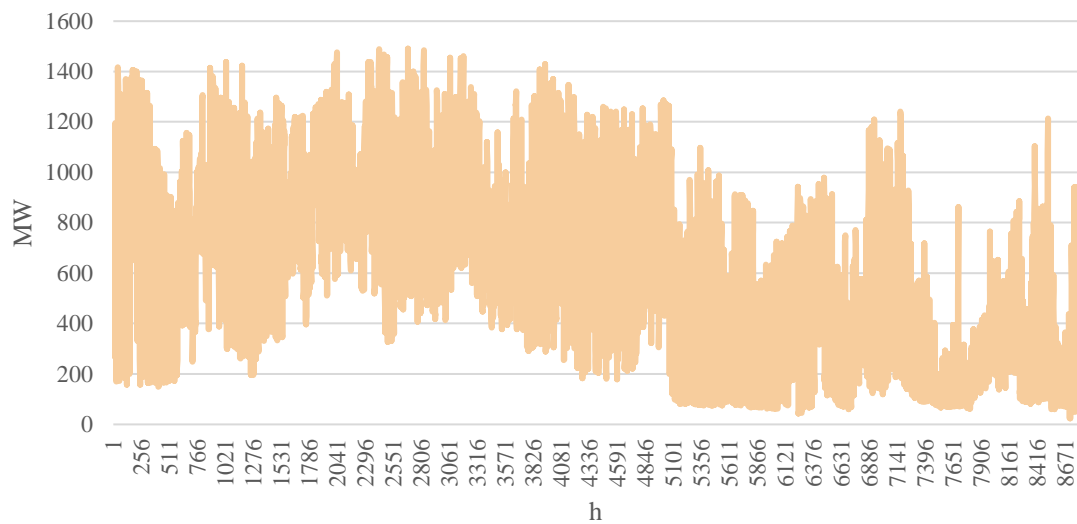
Slika 10. Distribucijska krivulja dozračene energije za proizvodnju iz solarnih kolektora elektrana Bugarske za 2015. godinu

Satne krivulje proizvodnje iz nuklearne elektrane, akumulacijskih i protočnih hidroelektrana dobivene su prema podacima iz ENTSO-E [13]. Na Slici 11. prikazana je proizvodnja iz nuklearne elektrane za 2015. godinu.



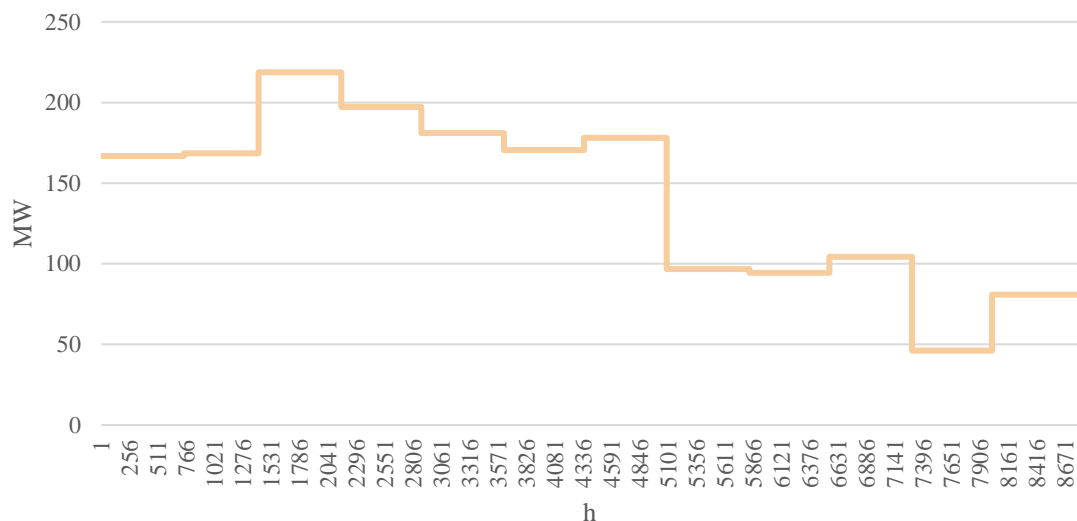
Slika 11. Distribucijska krivulja za nuklearnu elektranu Bugarske za 2015. godinu

Akumulacijske elektrane, kako im i sam naziv kaže, zahtijevaju akumulaciju vode. U Bugarskoj su njeni potencijali potpuno iskorišteni. Distribucijska krivulja je prikazana na Slici 12.



Slika 12. Distribucijska krivulja za akumulacijske hidroelektrane Bugarske za 2015. godinu

Protočne hidroelektrane su hidroelektrane bez ili s malom satnom, odnosno dnevnom akumulacijom. Distribucijska krivulja za Bugarsku prikazana je na Slici 13.



Slika 13. Distribucijska krivulja za protočne hidroelektrane Bugarske za 2015. godinu

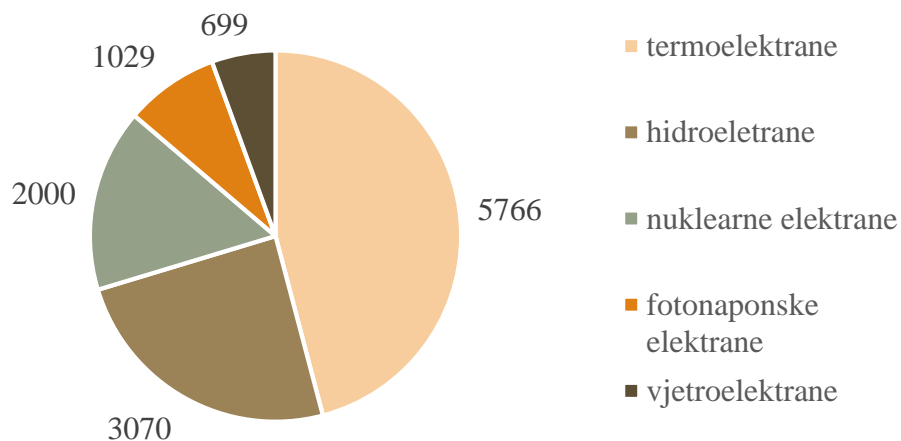
5. IZRADA SCENARIJA

Referentni scenarij Bugarske izrađen je za 2015. godinu. Osnovni, „business as usual“ scenariji izrađeni su za 2030. i 2040. godinu te na temelju njih „HighRES“ scenariji razvoja s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije za iste godine.

5.1. Referentni scenarij za 2015. godinu

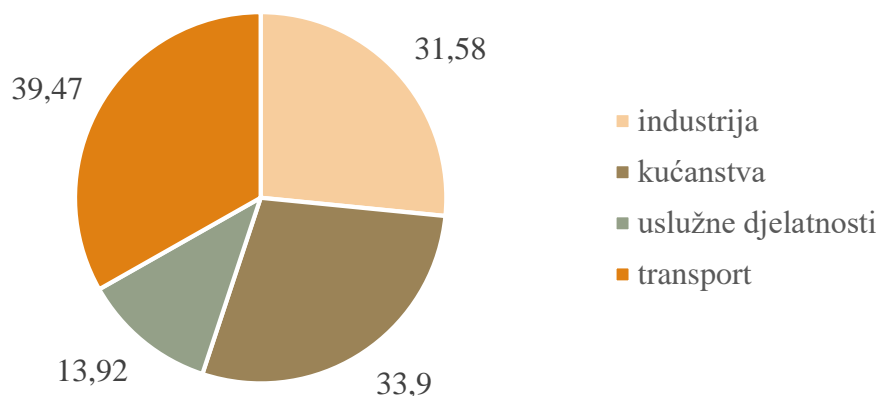
Referentni scenarij Bugarske modeliran je za 2015. godinu. Izrađen scenarij koristit će se za verifikaciju distribucijskih krivulja proizvodnje energije iz varijabilnih obnovljivih izvora energije.

Za izradu scenarija prikupljeni su podaci o energetske sustavu Bugarske za 2015. godinu. Koristit će se dostupne baze podataka: IEA [15], ENTSO-E [20], eurostat [21] i NSI [22]. U EnergyPLAN će se unijeti podaci o instaliranim kapacitetima s potrošnjom energenata, potrošnja energije po sektorima te modelirane distribucijske krivulje. Na Slici 14. prikazani su ukupni instalirani kapaciteti za 2015. godinu.



Slika 14. Instalirani kapaciteti Bugarske za 2015. godinu u MW

Slika 15. prikazuje raspodjelu konačne potrošnje energije po sektorima u TWh za Bugarsku u 2015. godini.



Slika 15. Konačna potrošnja energije po sektorima Bugarske za 2015. godinu u TWh

Nakon unosa svih potrebnih podataka i distribucijskih krivulja provedla se simulacija u EnergyPLAN-u. Dobiveni su sljedeći rezultati, prikazani u Tablici 1., o proizvodnji električne energije iz pojedinog izvora, emisijama CO₂ i ukupnoj opskrbi primarne energije za 2015. godinu. Usporedbom s podacima iz postojećih baza podataka, može se zaključiti da se distribucijske krivulje mogu koristiti i za analize budućih scenarija.

Tablica 1. Usporedba dobivenih i postojećih vrijednosti iz baza podataka za 2015. godinu

	<i>ENTSO-E</i>	<i>IEA</i>	<i>eurostat</i>	<i>NSI (Nacionalni statistički institut Bugarske)</i>	<i>EnergyPLAN</i>
emisije CO₂ (Mt)	/	44	48,1	45,4	45,79
proizvodnja el. energije (TWh)					
<i>vjetroelektrane</i>	1,4	1,452	1,452	1,452	1,45
<i>fotonaponske elektrane</i>	1,4	1,383	1,383	1,383	1,38
<i>hidroelektrane</i>	6,2	6,147	6,147	6,147	6,15
<i>nuklearne elektrane</i>	14,3	15,383	15,383	15,383	15,38
<i>termoelektrane</i>	21,1	24,568	24,837	24,84	25,08
TPES	/	216,39	215,21	209,78	215,67

5.2. Osnovni BAU scenariji za 2030. i 2040. godinu

Osnovni scenariji za 2030. i 2040. godinu napravljeni su prema Nacionalnom energetske i klimatskom planu, engl. „National energy and climate plan“ (NECP). Članice EU obvezale su se izraditi NECP za period od 2021. do 2030. godine kako bi se dostigli energetske i klimatske ciljevi Europske unije za 2030. godinu. NECP obrađuje područja energetske učinkovitosti, obnovljivih izvora energije, stakleničkih plinova, smanjenja emisija, međusobne povezanosti te istraživanja i inovacija [23]. Izrađeni osnovni scenariji za 2030. i 2040. godinu temelje se na WEM (Scenario with existing policies and measures) scenariju Integriranog energetske i klimatske plana Republike Bugarske 2021-2030 [24]. WEM scenarij u NECP-u je razvijen u skladu s postojećim mjerama i važećim politikama. Podaci o konačnoj potrošnji po sektorima nalazi se u Tablici 2.

Tablica 2. Konačna potrošnja po sektorima Bugarske u BAU scenarijima (TWh)

	industrija	kućanstvo	uslužne djelatnosti	transport	ukupno
2030.	34,7	28,02	14,69	43,6	121,01
2040.	34,51	28,97	14,8	40,69	115,97

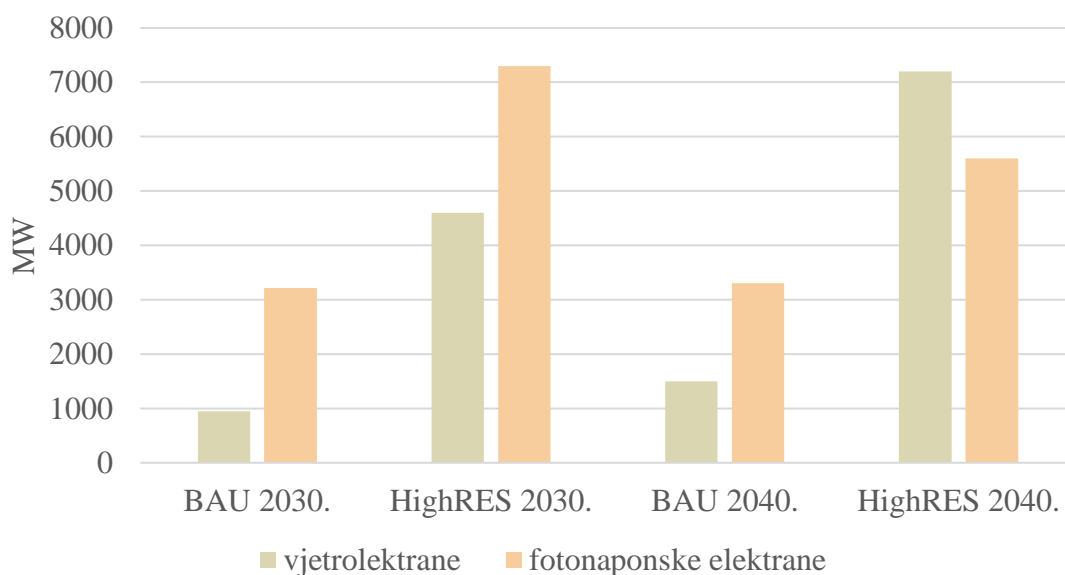
Raspodjela i ukupni instalirani kapaciteti za 2030. i 2040. godinu prema BAU scenarijima nalazi se u Tablici 3.

Tablica 3 Instalirani kapaciteti Bugarske u BAU scenarijima (MW)

	2030.	2040.
termoelektrane	5200	4400
hidroelektrane	2500	2500
nuklearna elektrana	1900	3900
fotonaponske elektrane	3300	3300
vjetroelektrane	900	1500
<i>ukupno</i>	13800	15600

5.3. HighRES scenariji s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije za 2030. i 2040. godinu

Scenariji s visokim udjelom obnovljivih izvora energije za 2030. i 2040. godinu napravljeni su samostalno uz korištenje Integriranog energetskeg i klimatskog plana Republike Bugarske 2021-2030 [24] i projekta razvijanja scenarija sektora električne energije do 2050. za jugoistočnu Europu [25]. Pretpostavlja se da se potrošnja električne energije, kao i potrošnja po sektorima, neće mijenjati u odnosu na osnovne scenarije. Cilj scenarija je instalacija visokog udjela varijabilnih obnovljivih izvora energije i kasnije analiza kako odziv potrošnje utječe na njihovu integraciju. Do 2030. u osnovnom scenariju instalirano je 3216 MW fotonaponskih elektrana i 948 MW vjetroelektrana, dok je u 2040. instalirano 3300 MW PV elektrana i 1500 MW vjetroelektrana. Dekomisija postojeće nuklearne elektrane zakazana je tek 2060. godine, tako da će se u ovom scenariju zadržati, ali pretpostavljena gradnja nove u osnovnom scenariju 2040. neće se provesti. Hidro potencijali Bugarske su potpuno iskorišteni tako da udio hidroelektrana ostaje isti [23]. Udio obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije u 2030. godini bit će 66,9% od čega 4600 MW vjetroelektrana i 7300 MW fotonaponskih elektrana. U 2040. udio će iznositi 77,9%, 7200 MW vjetroelektrana i 5600 MW fotonaponskih elektrana. Na Slici 16. prikazana je usporedba instaliranih kapaciteta u 2030. i 2040. godini za osnovne tj. „business as usual“ scenarije i scenarije s visokim udjelom VOIE.

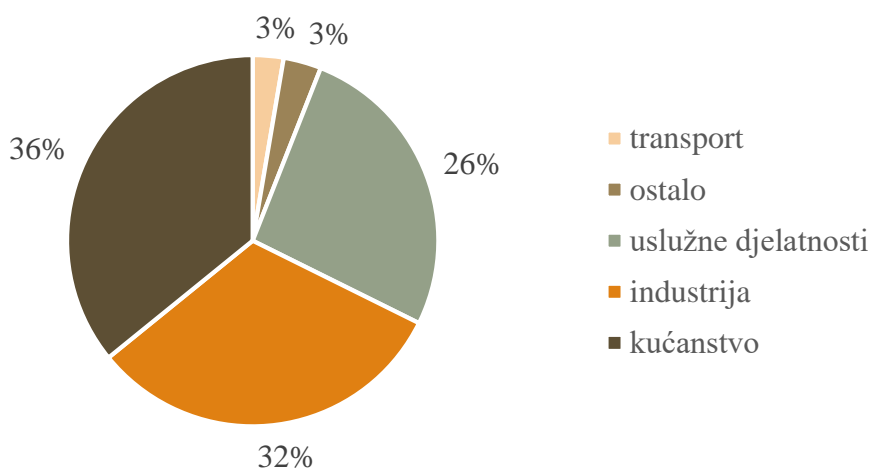


Slika 16. Instalirani kapaciteti VOIE u BAU i HighRES scenarijima

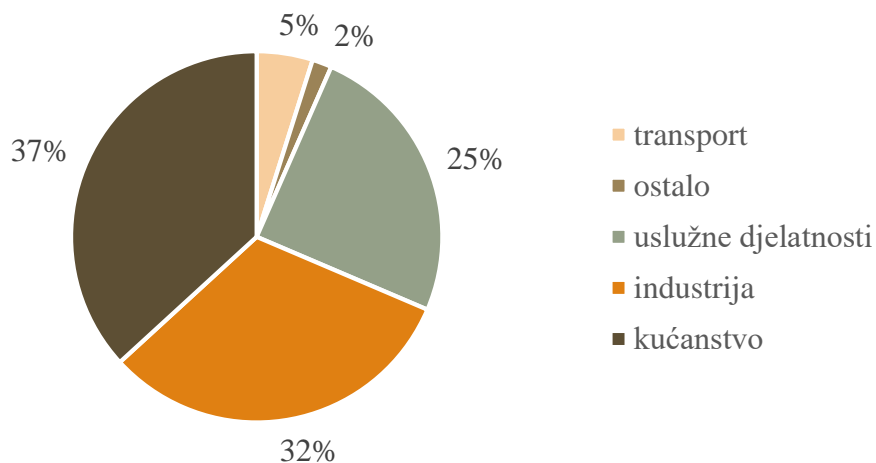
6. POTENCIJAL ODZIVA POTROŠNJE U SVIM SEKTORIMA POTROŠNJE ENERGIJE U BUGARSKOJ

6.1. Struktura potrošnje električne energije u Bugarskoj

U Integriranom energetske i klimatskom plana Republike Bugarske 2021-2030 [24] načinjene su projekcije potrošnje električne energije po sektorima za 2030. i 2040. godinu. Uslužne djelatnosti i kućanstvo čine gotovo 60% potrošnje, dok transport u 2030. godini čini samo 3%, no u 2040. raste na 5%. Ukupna potrošnja električne energije u 2030. godini procijenjena je na 36 TWh dok u 2040. iznosi 39 TWh.

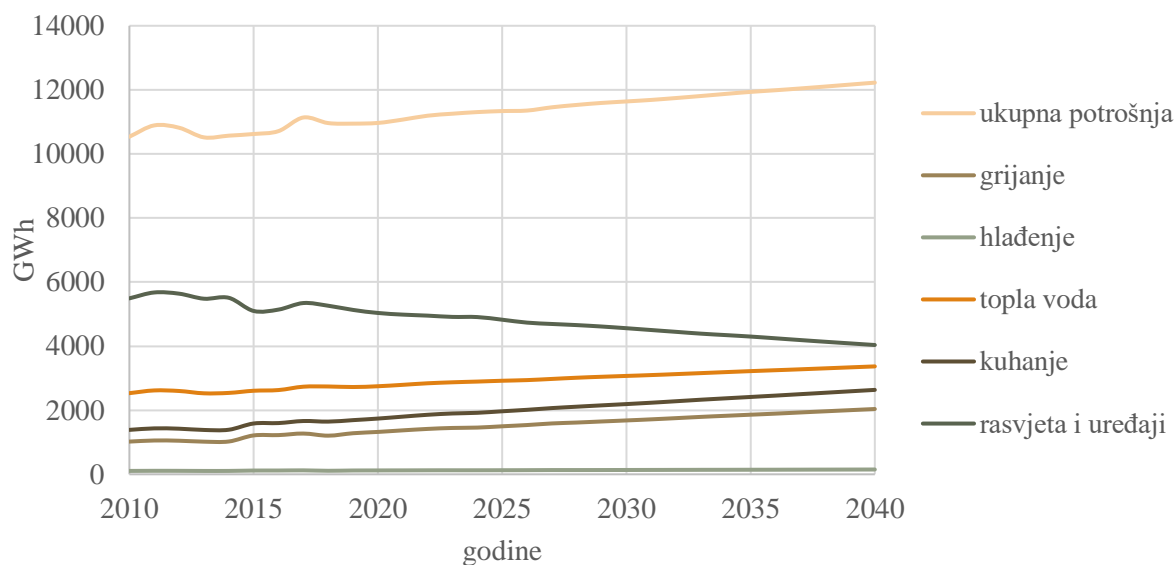


Slika 17. Potrošnja električne energije po sektorima za 2030. godinu



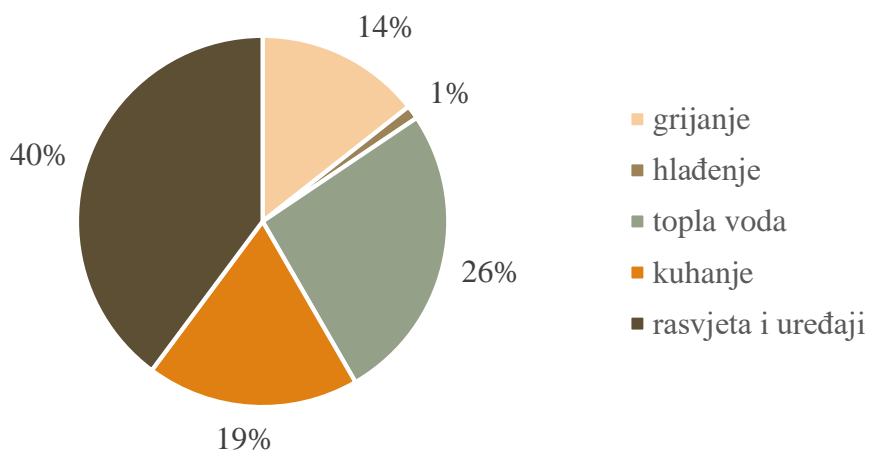
Slika 18. Potrošnja električne energije po sektorima potrošnje za 2040. godinu

Iz eurostata [20] su prikupljeni podaci od 2010. do 2018. godine o krajnjoj potrošnji električne energije u kućanstvima. Iz tih podataka u Excelu [26] je, pomoću funkcije TREND, napravljena projekcija potrošnje, na Slici 19., za 2030. i 2040. godinu.

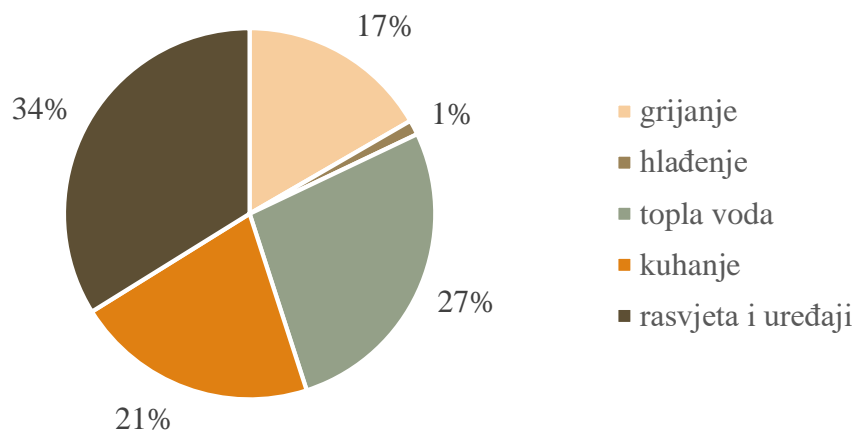


Slika 19. Projekcija kretanja krajnje potrošnje u sektoru kućanstva do 2040. godine

Primjećuje se porast upotrebe električne energije za grijanje, dok se istodobno smanjuje potrošnja kod rasvjete i uređaja što je u skladu s očekivanim razvojem energetske učinkovitosti. Potrošnja u kućanstvima procijenjena je na 12,96 TWh u 2030. i 14,43 TWh u 2040. godini.



Slika 20. Krajnja potrošnja električne energije u kućanstvima za 2030. godinu



Slika 21. Krajnja potrošnja električne energije u kućanstvima za 2040. godinu

Potrošnja u sektoru industrije također je napravljena prema podacima iz eurostat-a i prikazana je u Tablici 4. Ukupna procijenjena potrošnja u 2030. godini iznosi 11,52 TWh, a u 2040. 12,48 TWh. Pretpostavlja se isti udio potrošnje u industrijskim granama za obje godine.

Tablica 4. Potrošnja električne energije u industrijskim granama za Bugarsku

	električna energija (TWh)		udio (%)
	2030.	2040.	
željezo i čelik	0,92	1	8
kemijska i petrokemijska industrija	1,61	1,75	14
obojeni metali	1,27	1,37	11
nemetalni minerali	1,15	1,25	10
oprema za prijevoz	0,12	0,12	1
mehanizacija	1,27	1,37	11
rudnici i kamenolomi	1,27	1,37	11
hrana, piće i duhan	1,5	1,62	13
papir, celuloza i tisak	0,58	0,62	5
drvo i drveni proizvodi	0,35	0,37	3
gradnja	0,23	0,25	2
tekstil i koža	0,46	0,5	4
ostalo	0,81	0,87	7

Potrošnja u sektoru uslužnih djelatnosti iznosi 9,36 TWh u 2030. i 9,75 TWh u 2040. godini. Budući da nije dostupna detaljna raspodjela potrošnje električne energije unutar sektora,

potencijal odziva će se procijeniti na temelju sektora kućanstva i prema [27]. U Bugarskoj je mali broj električnih automobila i nerazvijena povezanost na mrežu te se potencijal transporta u odzivu potrošnje neće razmatrati.

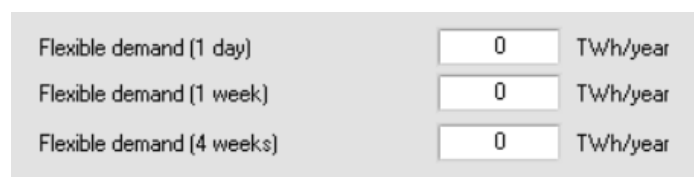
6.2. Analiza potencijala odziva potrošnje u Bugarskoj

Bugarska trenutno nema zadovoljavajući zakonodavni okvir za implementaciju „demand response-a“ i trenutno je u procesu potpune liberalizacije tržišta. Mreža i potrošači (pametna brojila) su tehnički nerazvijeni, što onemogućava daljnji razvoj i primjenu odziva potrošnje u energetsom sustavu [23]. Energy and Water Regulatory Commission smatra da uvođenjem povlaštenih cijena povećava potrošačko sudjelovanje u učinkovitosti mreže kroz „demand response“ te potiče distribucijske mrežne operatore na daljnje poduzimanje mjera. Cilj im je uvesti dinamično određivanje cijena upotrebom [24] :

- time-of-use cijena;
- critical peak naplate;
- real time naplate;
- peak time popusta za vrijeme manje potrošnje.

Međutim, još nisu donesene stvarne mjere i strategije uvođenja odziva potrošnje u energetske sustav.

Odziv potrošnje će se simulirati kroz „flexible demand“ opcije u EnergyPLAN-u, koje omogućavaju pomak potrošnje na dnevnoj, tjednoj i mjesečnoj razini. Bugarska nema potencijala za odziv potrošnje na mjesečnoj bazi pa se on neće razmatrati.



Flexible demand (1 day)	0	TWh/year
Flexible demand (1 week)	0	TWh/year
Flexible demand (4 weeks)	0	TWh/year

Slika 22. Flexible demand opcije u EnergyPLAN-u [11]

U sektoru kućanstva pretpostavlja se da će se u 2030. 20% potrošnje el. energije za toplu vodu moći učiniti fleksibilnom na dnevnoj bazi, dok će u 2040. iznositi 30%. 25% od potrošnje koju čini rasvjeta i uređaji u kućanstvima bit će fleksibilna na dnevnoj bazi u 2030. i 2040. godini,

dok na tjednoj bazi fleksibilna će biti 3% potrošnje. Pritom se misli na potrošnju zamrzivača, hladnjaka, perilica rublja, perilica posuđa, itd. Potrošnja rasvjete, računala, kuhanja i potrošnje vezane uz zabavu neće se pretpostaviti fleksibilnim, kako se ne bi narušila kvaliteta života. Sektor uslužnih djelatnosti, posjeduje veće kapacitete skladištenja energije (grijanje, hlađenje, ventilacija, oprema za pranje) tako da će se pretpostaviti da je 20% ukupne potrošnje u 2030. godini fleksibilna na dnevnoj bazi, dok u 2040. iznosi 23%. U studiji provedenoj u Kaliforniji [28] istraživao se potencijal pojedinih grana industrije u implementaciji odziva potrošnje te se pokazalo da u industrijama hrane i pića, preradi metala i nemetalnih minerala te kemijskoj i petrokemijskoj industriji postoji najveći potencijal odziva potrošnje. Budući da te grane u Bugarskoj čine oko 45% potrošnje električne energije u industriji procjenjuje se da industrija u Bugarskoj može 10% ukupne potrošnje učiniti fleksibilnom na tjedan dana i 15% na dnevnoj bazi u 2030. godini, dok će se u 2040. povećati za 5%. Na temelju sljedećeg izrađena je Tablica 5. ukupnog potencijala odziva potrošnje u Bugarskoj.

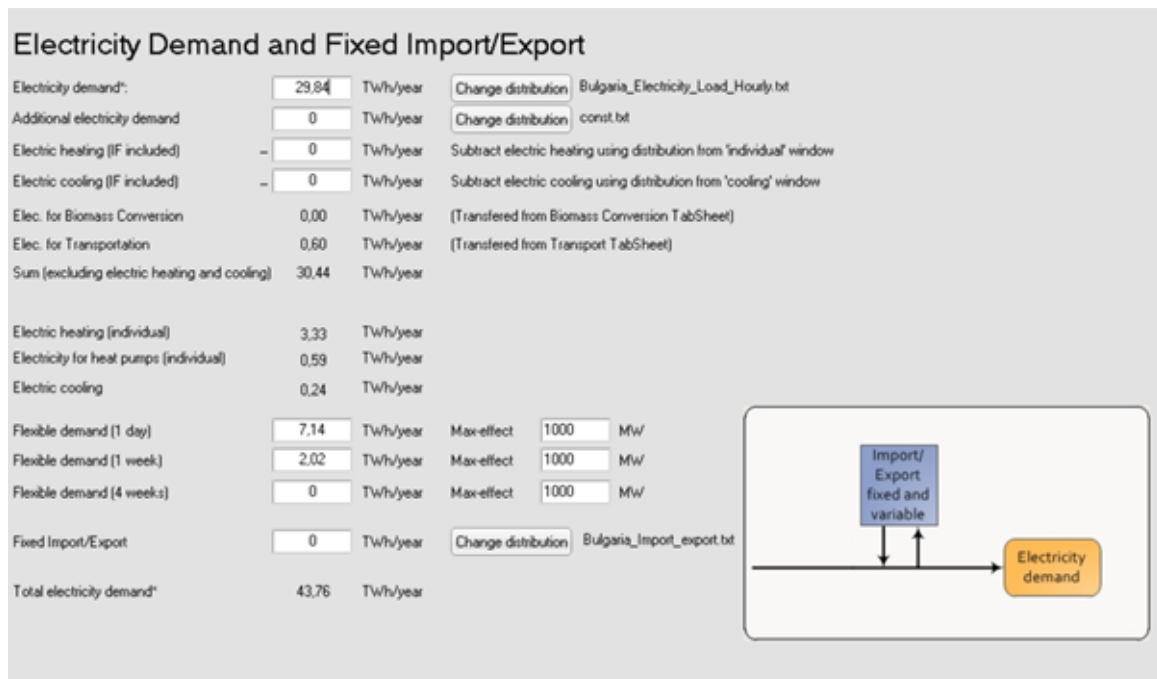
Tablica 5. Ukupni potencijal odziva potrošnje u Bugarskoj u 2030. i 2040. godini

	potencijal odziva potrošnje (TWh)			
	dnevna baza		tjedna baza	
	2030.	2040.	2030.	2040.
kućanstvo	1,97	2,4	0,16	0,15
uslužne djelatnosti	1,87	2,24		
industrija	1,73	2,5	1,15	1,87
<i>ukupno</i>	<i>5,57</i>	<i>7,14</i>	<i>1,31</i>	<i>2,02</i>



Slika 23. Modeliranje odziva potrošnje u 2030. godini [11]

U 2040. u odnosu na 2030. godinu, potrošnja električne energije porasla je za 3,7 TWh.



Slika 24. Modeliranje odziva potrošnje u 2040. godini [11]

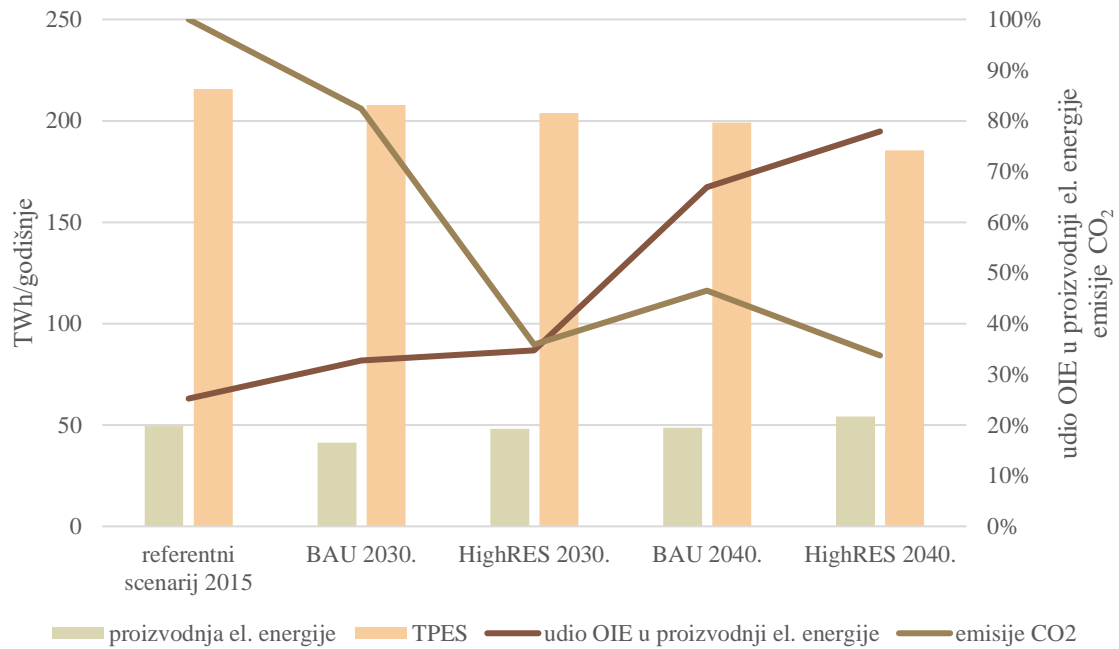
7. REZULTATI

U Tablici 6. prikazani su rezultati dobiveni iz svih scenarija za Bugarsku 2015., 2030. i 2040. godine. Sukladno smjernicama razvoja Bugarske prema [24], dobiven je očekivani pad emisija CO₂ i sve veći udio obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije. Zanimljivo je primijetiti da u scenariju s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije za 2040. godinu, proizvodnja električne energije iz termoelektrana je veća, nego u osnovnom BAU scenariju iste godine. Razlog je u tome što je u osnovnom scenariju predviđena izgradnja nove nuklearne elektrane kapaciteta 2000 MW, dok je u scenariju s visokim udjelom VOIE izostavljena.

Tablica 6. Usporedba rezultata dobivenih iz svih scenarija

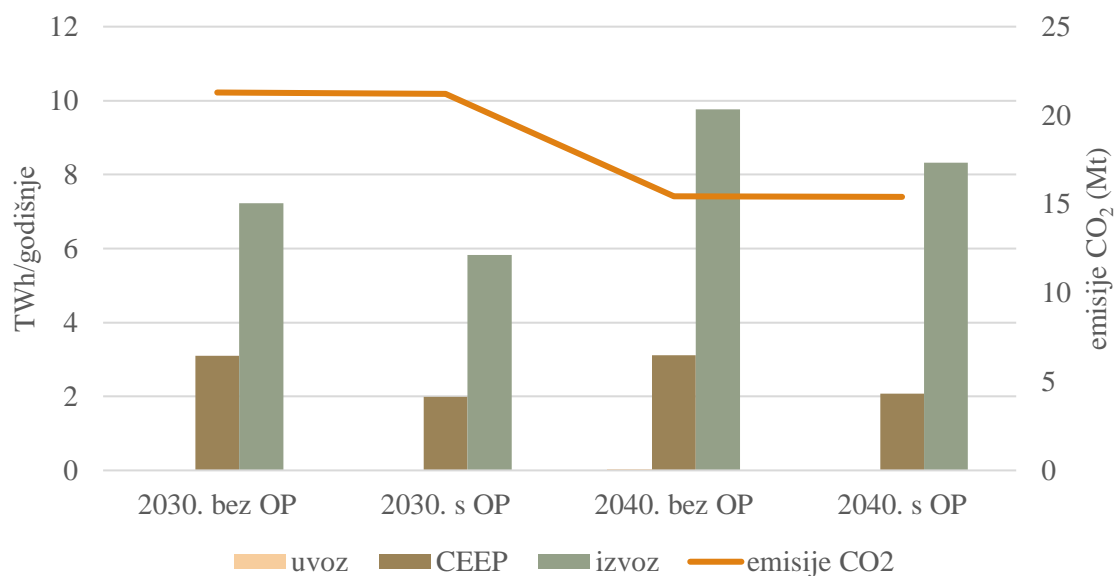
	<i>referentni scenarij 2015.</i>	<i>BAU 2030.</i>	<i>BAU 2040.</i>	<i>HighRES 2030.</i>	<i>HighRES 2040.</i>
emisije CO₂ (Mt)	45,79	37,71	16,43	21,29	15,43
proizvodnja el. energije (TWh)					
<i>vjetroelektrane</i>	1,45	1,9	3,62	9,21	17,4
<i>fotonaponske elektrane</i>	1,38	4,84	4,85	11,01	8,2
<i>hidroelektrane</i>	6,15	4,72	4,72	4,72	4,72
<i>nuklearke elektrane</i>	15,38	14,92	30,3	14,92	14,76
<i>termoelektrane</i>	25,08	14,76	5,23	8,17	8,95
TPES	215,67	207,87	203,94	194,95	186,06
udio OIE u proizvodnji el. energije (%)	25,2	32,7	34,7	66,9	77,9

Grafički prikaz usporedbe rezultata prikazan je na Slici 25. gdje se vidi kako ukupna potrošnja energije postupno pada kroz scenarije, dok udio OIE u proizvodnji električne energije raste.



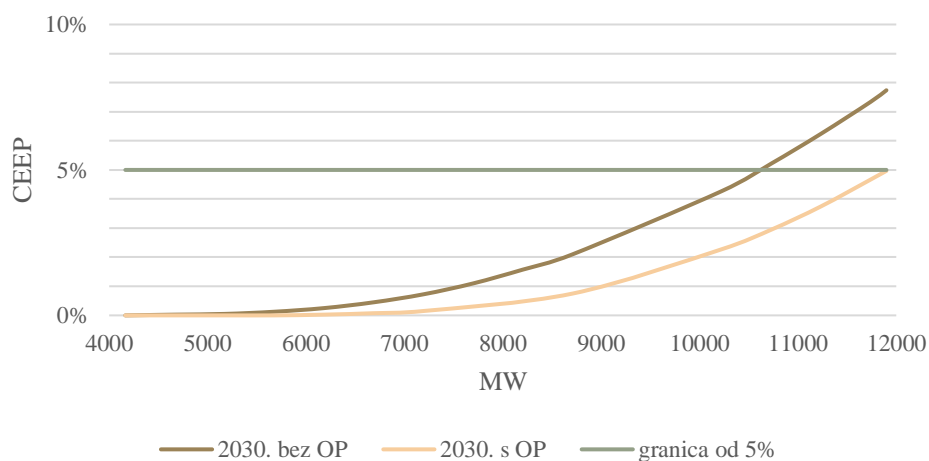
Slika 25. Usporedba rezultata dobivenih iz svih scenarija

Uporabom odziva potrošnje u scenarijima s visokim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije, može se primijetiti pad CEEP-a tj. „critical excess electricity production“. On predstavlja višak proizvedene električne energije zbog promjenjive proizvodnje varijabilnih obnovljivih izvora energije, u ovom slučaju fotonaponskih i vjetroelektrana. Upravo zato implementacija odziva potrošnje u moderne energetske sustave s visokim udjelom VOIE predstavlja jedno od rješenja u njihovoj integraciji.

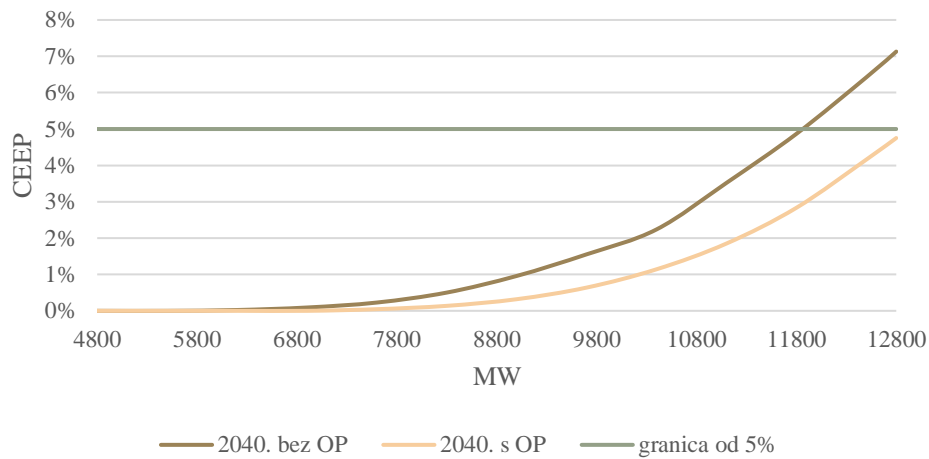


Slika 26. Usporedba scenarija s visokim udjelom VOIE s i bez odziva potrošnje

Na slikama 27. i 28. dan je prikaz porasta CEEP-a, odnosno kritičnog viška proizvodnje električne energije, prema porastu instaliranih vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana. Na slikama je prikazana i granica od 5% CEEP-a od ukupne potrošnje električne energije, koja je procijenjena prema literaturi [29], te predstavlja granicu do koje je ekonomski opravdana instalacija varijabilnih obnovljivih izvora energije. Tako se vidi da se odzivom potrošnje opravdani kapacitet instalacije VOIE u 2030. pomiče za više od 1000 MW, a u 2040. za 1000 MW.

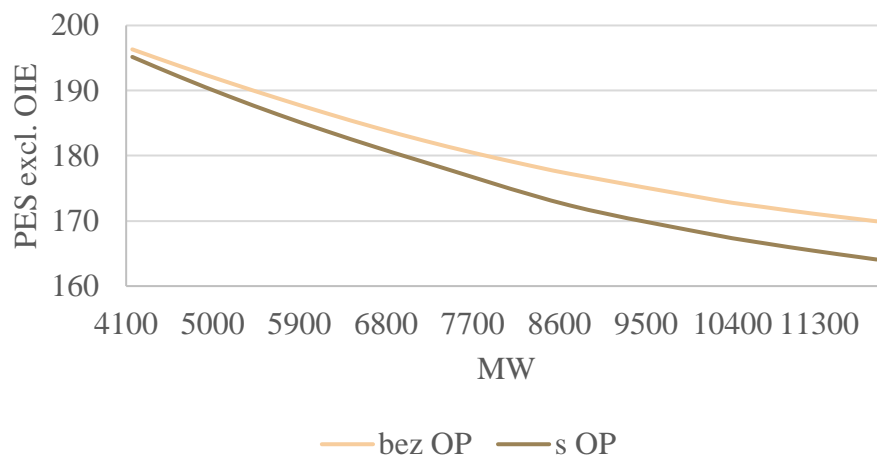


Slika 27. Ovisnost CEEP-a prema instaliranoj snazi VOIE za 2030. godinu

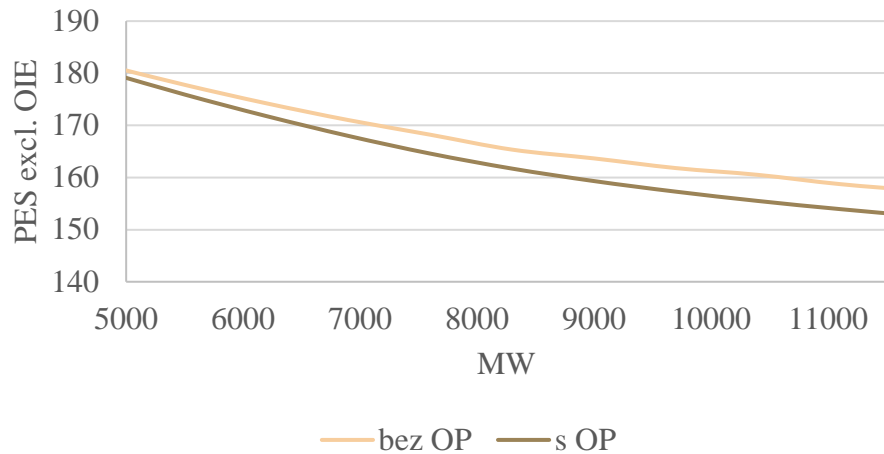


Slika 28. Ovisnost CEEP-a prema instaliranoj snazi VOIE za 2040. godinu

Na Slikama 29. i 30. prikazan je pad ukupne potrošnje energije u energetske sustavu Bugarske, isključivo obnovljive izvore energije, u odnosu na porast instalacija VOIE. Primjećuje se da je s odzivom potrošnje ukupna potrošnja energije bez OIE u većem padu od scenarija u kojem nije primijenjena.



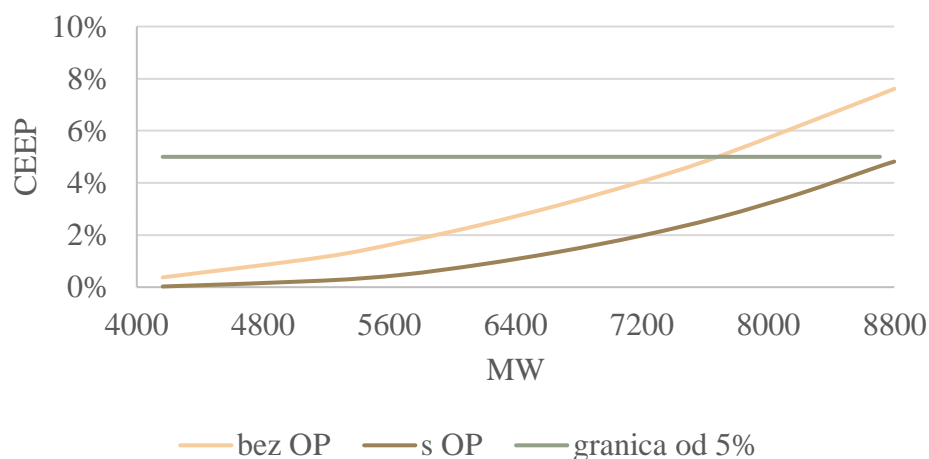
Slika 29. Ovisnost ukupne potrošnje energije bez OIE prema instaliranoj snazi VOIE za 2030. godinu



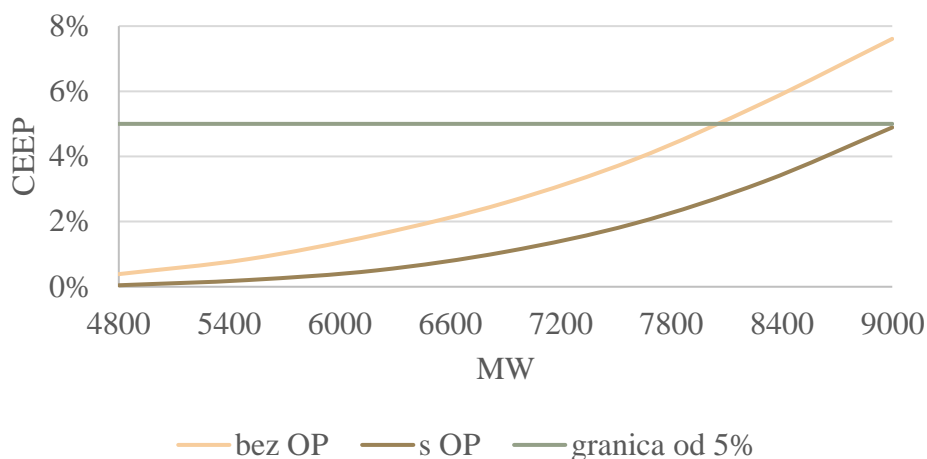
Slika 30. Ovisnost ukupne potrošnje energije bez OIE prema instaliranoj snazi VOIE za 2040. godinu

7.1. Analiza za slučaj zatvorenog sustava

Prethodni rezultati su prikazani za slučaj otvorenog energetskeg sustava, a u ovom djelu, radi sigurnosti opskrbe, bit će promotreni rezultati za zatvoreni sustav. Kako bi CEEP ostao unutar granice od 5%, ne mogu se instalirati toliko kapaciteti VOIE pa je tako u 2030. instalirano 8800 MW, a u 2040. godini 9000 MW.

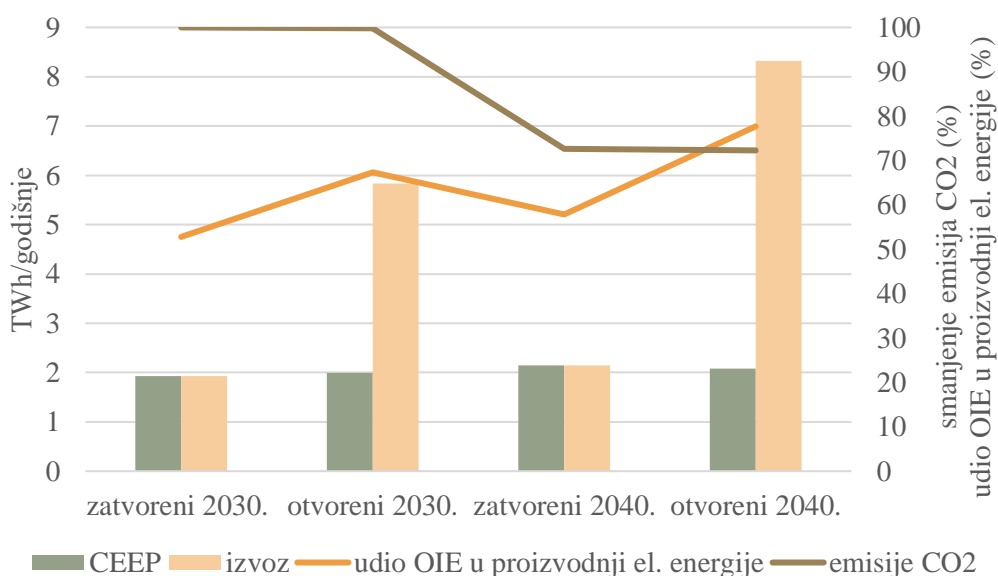


Slika 31. Ovisnost CEEP-a prema instaliranoj snazi VOIE za 2030. godinu u zatvorenom sustavu



Slika 32. Ovisnost CEEP-a prema instaliranoj snazi VOIE za 2040. godinu u zatvorenom sustavu

U zatvorenom sustavu dolazi do smanjenja integracije VOIE te se u 2030. godini, za HighRES scenarij s odzivom potrošnje, samo 52,8% električne energije proizvodi iz OIE, a u 2040. 57,9%. Izvoz je u oba slučaja jednak nuli. Na slici 33. vidi se da Bugarska povećanom integracijom VOIE i planiranim razvojem elektroenergetске mreže i dalje može zadržati status jedne od većih izvoznica električne energije u jugoistočnoj Europi.



Slika 33. Usporedba rezultata za zatvoreni i otvoreni sustav

8. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada bio je prikazati kako odziv potrošnje utječe na integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije na primjeru energetskeg sustava Bugarske. Parametri koji nam pokazuju učinkovitost integracije su smanjenje kritičnog viška proizvodnje električne energije (CEEP-a) i smanjenje emisija CO₂ povećanjem instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora energije. Povećanje udjela VOIE utječe na nestabilnost mreže energetskeg sustava i predstavlja izazov u energetskeg planiranju. Ovim radom prikazano je kako odziv potrošnje smanjuje CEEP, no do 2040. godine nije doveden na nulu te sustav još nije postigao 100% obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije. Primjenom odziva potrošnje CEEP se smanjio za 35,8% u 2030. godini i 33,3% u 2040. u usporedbi s BAU scenarijima.

Kako bi se postigla potpuna integracija varijabilnih obnovljivih izvora energije u budućim scenarijima sa 100% obnovljivim izvorima energije, potreban je daljnji razvitak fleksibilnosti sustava, energetske učinkovitosti i povećanja kapaciteta skladištenja energije. Također od velike je važnosti razvoj pametnih mreža i poticanje sudjelovanja potrošača na energetskeg tržištu, samostalnim djelovanjem i/ili automatskim pametnim sustavima i uređajima.

Iz svega navedenog može se zaključiti da uspješan razvoj i implementacija odziva potrošnje u buduće energetske sustave predstavljaju jedan od bitnih čimbenika postizanja ciljeva energetskeg razvoja bez štetnih emisija CO₂ kako Bugarske, tako i svih ostalih energetskeg sustava.

LITERATURA

- [1] DOE, Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them, Tech. rep. Department of Energy Report to the US Congress, 2006.
- [2] Bertoldi, P, Zancanella, P, Boza-Kiss, B., Demand Response Status in EU Member States; EUR 27998 EN; doi:10.2790/962868
- [3] Cooney, S., Utility Adds 2.5 MW Of Demand Response Capabilities With Very Unusual “Batteries”, 2019
- [4] EIA, International Energy Outlook 2019, U.S. Department of Energy, Washington, 2019
- [5] Mathieu J.L., Modeling, Analysis, and Control of Response Resources, University of California, Berkeley, 2012
- [6] Krajačić, G., Duić, N., Mathiesen, B. & Carvalho, M., (2010) Smart Energy Storages for Integration of Renewables in 100% Independent Energy Systems. Chemical Engineering Transactions, 21, 391-396 doi:10.3303/CET1021066.
- [7] Pfeifer A., Krajačić G., Ljubas D., Duić N., Increasing the integration of solar photovoltaics in energy mix on the road to low emissions energy system – Economic and environmental implications, Renewable Energy, Volume 143, 2019
- [8] Dorotić, H., Doračić, B., Dobravec, V., Pukšec, T., Krajačić, G. & Duić, N., (2018) Integration of transport and energy sectors in island communities with 100% intermittent renewable energy sources. Renewable & sustainable energy reviews, 99, 109-124 doi:10.1016/j.rser.2018.09.033
- [9] Vržogić, L. (2019) 'Analiza integracije krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom električne i toplinske energije u postojeći energetska sustav', diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [10] Lund, H., Zinck Thellufsen, J., EnergyPLAN – Advanced energy system analysis Computer model, Documentation Version 15, Aalborg University, Denmark, 2019.
- [11] EnergyPLAN, Dostupno: <https://www.energyplan.eu/> (pristupljeno 20.8.2020.)
- [12] ENTSO-E, European network of transmission system operators for electricity, Dostupno: <https://www.entsoe.eu/data/power-stats/> (pristupljeno 23.4.2020)
- [13] Remund, J., Müller, S., Kunz, S., Huguenin-Landl, B., Schmid C., Schilter C., meteonorm – Global Meteorological Database, Version 7, METEOTEST, Bern, Switzerland, 2013.
- [14] Britannica, <https://www.britannica.com/place/Bulgaria>
- [15] IEA, International Energy Agency, Dostupno: <http://www.iea.org/>

- [16] European commission, Commission staff working document – Energy Union Factsheet Bulgaria, Brussels, 2017.
- [17] Government of European Development of Bulgaria, ENERGY STRATEGY of the Republic of Bulgaria till 2020, June 2011
- [18] BULGARIAN PHOTOVOLTAIC ASSOCIATION, Dostupno: <https://www.bpva.org/en/photovoltaics#RePowerMap> (pristupljeno 21.4.2020)
- [19] METEONORM, Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education, Dostupno: <https://meteonorm.com/>
- [20] ENTSO-E, STATISTICAL FACTSHEET 2015, Brussels, Belgium, 2016.
- [21] eurostat, Dostupno: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (pristupljeno 23.4.2020.)
- [22] NSI, Dostupno: <https://www.nsi.bg/en/content/11223/statistical-data> (pristupljeno 23.4.2020.)
- [23] European Commission, Dostupno: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/national-energy-climate-plans_en
- [24] Republic of Bulgaria, Ministry of Energy, Ministry of the Environment and Water: Integrated energy and climate plan of the Republic of Bulgaria 2021-2030
- [25] Laszlo, S., Mezosi, A., Pato, Z., SEERMAP: South East Europe Electricity Roadmap, Country report: Bulgaria 2017
- [26] Microsoft Excel, <https://www.microsoft.com/hr-hr/microsoft-365/excel>
- [27] Østergaard, P., Kwon, P.S., Assessment and evaluation of flexible demand in a Danish future energy scenario, Department of Development and Planning, Aalborg University, Denmark, 2014.
- [28] McKane, Aimee T., Mary Ann Piette, David Faulkner, Girish Ghatikar, Anthony Radspieler Jr., Bunmi Adesola, Scott Murtishaw and Sila Kiliccote. 2008. Opportunities, Barriers and Actions for Industrial Demand Response in California. PIER Industrial/Agricultural/Water End-Use Energy Efficiency Program. CEC-500-2008-XXX.
- [29] Lund H. Renewable Energy Systems. A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions. Second edition. Academic Press, Elsevier, Oxford, page 362, (2014.)