

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Komušanac**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Ivan Komunac

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Nevenu Duiću i asistentu Borisu Šosiću, dipl.ing. na stručnoj i ličnoj pomoći prilikom izrade ovog rada.

Ivan Komunac



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, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa:                              |        |
| Ur.broj:                            |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Komušanac** Mat. br.: 0035188239

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza utjecaja izgradnje vjetroelektrana i fotonaponskih sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of construction of wind plants and photovoltaic systems and their impact on the power system load of the Republic of Croatia**

Opis za datka:

Zbog energetske politike i sustava poticanja gradnje, fotonaponski sustavi i vjetroelektrane predstavljaju tehnologije koje se sve više nameću kao ekonomski prihvatljivo rješenje za proizvodnju električne energije kako u Europskoj uniji tako i u Republici Hrvatskoj. Svrha rada je analizirati ponašanje elektroenergetskog sustava (EES) Republike Hrvatske pri različitim udjelima proizvedene električne energije iz vjetroelektrana i fotonaponskih sustava.

U radu je potrebno:

1. Analizirati energetske bilance Republike Hrvatske.
2. U *EnergyPLAN* programu napraviti referentni scenarij potrošnje i dobave energije u Republici Hrvatskoj za 2012. godinu.
3. U istom programu napraviti analizu elektroenergetskog sustava za različite udjele proizvedene električne energije iz vjetroelektrana i fotonaponskih sustava.
4. Primjenom Pareto analize odrediti pri kojim je instaliranim kapacitetima vjetroelektrana i fotonaponskih sustava najmanji kritični višak proizvodnje električne energije.
5. Analiza i rezultati pod 2. i 3. trebaju sadržavati/prikazati: „kritični višak proizvodnje električne energije“ [TWh/godišnje], ukupnu potrošnju energije [TWh/godišnje], ukupnu potrošnju energije bez OIE [TWh/godišnje], proizvodnju energije iz OIE [TWh/godišnje], uvoz energije [TWh/godišnje], izvoz energije [TWh/godišnje] i emisije CO<sub>2</sub> [Mt].

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


Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
1. rok: 26. veljače 2015.  
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Neven Duić

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

|  |     |
|--|-----|
| SADRŽAJ .....  | I   |
| POPIS SLIKA .....  | II  |
| POPIS TABLICA .....  | III |
| SADRŽETAK .....  | IV  |
| SUMMARY .....  | V   |
| 1. UVOD .....  | 1   |
| 1.1. Opis Republike Hrvatske .....   | 1   |
| 1.2. Energetska situacija u Europskoj uniji .....                          | 1   |
| 1.3. Energetska situacija u Republici Hrvatskoj .....                      | 4   |
| 2. METODOLOGIJA .....  | 5   |
| 2.1. EnergyPLAN .....  | 5   |
| 2.1.1. Regulacijske strategije .....                                       | 6   |
| 2.2. Distribucijske krivulje .....   | 7   |
| 2.2.1. Krivulja potrošnje električne energije .....                        | 8   |
| 2.2.2. Krivulja uvoza i izvoza električne energije .....                   | 8   |
| 2.2.3. Krivulja satnog toplinskog opterećenja .....                        | 9   |
| 2.2.4. Krivulja dozraženosti sunčeve energije za fotonaponske module ..... | 10  |
| 2.2.5. Krivulja proizvodnje energije iz vjetroelektrana .....              | 10  |
| 2.3. Scenarijski pristup .....   | 11  |
| 2.4. Pareto analiza .....  | 12  |
| 3. REZULTATI .....   | 13  |
| 3.1. Analiza energetske bilance Republike Hrvatske .....                   | 13  |
| 3.2. Bazna godina .....  | 14  |
| 3.2.1. Potrošnja električne energije (Electricity - Demand) .....          | 14  |
| 3.2.2. Toplinsko opterećenje (Heating - Demand) .....                      | 15  |
| 3.2.3. Obnovljivi izvori energije (Supply - Electricity only) .....        | 15  |
| 3.2.4. Pohrana električne energije (Balancing and Storage) .....           | 15  |
| 3.3. Provjera bazne godine .....   | 16  |
| 3.4. Izrada scenarija .....  | 17  |
| 3.5. Primjena Pareto analize .....   | 18  |
| 4. OCJENJIVANJE SCENARIJA .....  | 28  |
| 5. ANALIZA OSJETLJIVOSTI .....   | 31  |
| 6. ZAKLJUČAK .....   | 34  |
| LITERATURA .....   | 35  |
| PRILOZI .....  | 38  |

**POPIS SLIKA**

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Insolacija u Hrvatskoj [10] .....  | 2  |
| Slika 2.  | Atlas vjetra [22] .....  | 3  |
| Slika 3.  | Shematski prikaz EnergyPLAN programa .....                                     | 5  |
| Slika 4.  | Satna krivulja potrošnje električne energije .....                             | 8  |
| Slika 5.  | Satna krivulja toplinskog opterećenja .....                                    | 9  |
| Slika 6.  | Dozraena količina sunčeve energije za fotonaponske module.....                 | 10 |
| Slika 7.  | Krivulja postotka nazivne snage vjetroelektrana u Dalmaciji .....              | 11 |
| Slika 8.  | Shematski prikaz Pareto analize [39] .....                                     | 12 |
| Slika 9.  | Rast CEEP-a u ovisnosti o instaliranim kapacitetima vjetroelektrana.....       | 17 |
| Slika 10. | Rast CEEP-a u ovisnosti o instaliranim kapacitetima fotonaponskih modula ..... | 18 |
| Slika 11. | Pareto analiza scenarija kada su fotonaponski moduli konstantni .....          | 19 |
| Slika 12. | Pareto analiza kada su vjetroelektrane konstantne .....                        | 20 |
| Slika 13. | CEEP-fotonaponski moduli dijagram .....  | 21 |
| Slika 14. | CEEP-vjetroelektrane dijagram .....  | 22 |
| Slika 15. | CEEP-RES dijagram za konstantan iznos fotonaponskih modula.....                | 23 |
| Slika 16. | CEEP-RES dijagram za konstantan iznos vjetroelektrana .....                    | 24 |
| Slika 17. | CEEP-Uvoz dijagram za konstantan iznos fotonaponskih modula .....              | 26 |
| Slika 18. | CEEP-Uvoz dijagram za konstantan iznos vjetroelektrana .....                   | 27 |
| Slika 19. | CEEP-RES dijagram za promijenjene vrijednosti teflina .....                    | 31 |
| Slika 20. | CEEP-CO2 dijagram za promijenjene vrijednosti teflina .....                    | 32 |
| Slika 21. | CEEP-uvoz dijagram za promijenjene vrijednosti teflina.....                    | 33 |

**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Popis termoelektrana u RH.....  | 13 |
| Tablica 2. Energetska bilanca elektri ne energije .....  | 14 |
| Tablica 3. Rezultati modela bazne 2012. godine.....  | 16 |
| Tablica 4. Optimalni scenariji za CEEP-CO <sub>2</sub> graf kada su kapaciteti fotonapona konstantni           | 19 |
| Tablica 5. Optimalni scenariji za CEEP-CO <sub>2</sub> graf kada su kapaciteti vjetroelektrana konstantni..... | 20 |
| Tablica 6. Optimalni scenariji za CEEP-fotonaponski moduli graf .....  | 22 |
| Tablica 7. Optimalni scenariji za CEEP-kapaciteti vjetroelektrana graf .....                                   | 23 |
| Tablica 8. Optimalni scenariji za CEEP-RES graf kada su kapaciteti fotonapona konstantni .....                 | 24 |
| Tablica 9. Optimalni scenariji za CEEP-RES graf kada su kapaciteti vjetroelektrana konstantni.....             | 25 |
| Tablica 10. Optimalni scenariji za CEEP-uvoz graf kada su kapaciteti fotonapona konstantni .....               | 26 |
| Tablica 11. Optimalni scenariji za CEEP-uvoz graf kada su kapaciteti vjetroelektrana konstantni.....           | 27 |
| Tablica 12. Vrijednosti kriterija te propisane tefline .....   | 28 |
| Tablica 13. Ukupne ocjene najgorih scenarija .....   | 29 |
| Tablica 14. Ukupne ocjene vrlo dobrih scenarija.....   | 29 |
| Tablica 15. Ukupne ocjene dobrih scenarija .....   | 30 |
| Tablica 16. Ukupna ocjene najboljeg scenarija.....   | 30 |

**SAŽETAK**

Dok nova Europska direktiva za 2030. godinu za okoliš i energetiku zahtijeva smanjenje emisije stakleničkih plinova za minimalno 40% u odnosu na razinu iz 1990. godine, Republika Hrvatska nije agresivno krenula u implementaciju obnovljivih izvora energije kao ostale europske zemlje. U vremenima kada vjetroelektrane i fotonaponski sustavi predstavljaju relativno jeftinu tehnologiju za proizvodnju električne energije, ovaj rad će analizirati utjecaj izgradnje vjetroelektrana i fotonaponskih sustava kako bi se prikazao optimalni omjer izgradnje takvih sustava za elektroenergetski sustav Republike Hrvatske. Simulacije su napravljene u EnergyPLAN programu za 2012. godinu. Nakon odabira nekoliko oba avaj ih scenarija, primjenom Pareto analize će se prikazati koji je najbolji scenarij za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije, scenarij s najnižom razinom uvoza električne energije, scenarij s najnižom CO<sub>2</sub> emisijom i scenarij s najnižim kritičnim viškom proizvedene električne energije. Na kraju će svi ti scenariji biti podvrgnuti analizi višestrukih kriterija kako bi se pronašao najbolji scenarij. Provedene analize pokazale su da najbolje parametre ima scenarij koji je imao 1,65 GW vjetroelektrana i 1,6 GW fotonapona, što dokazuje da će fotonapon imati veći ulogu u Republici Hrvatskoj nego što se očekivalo.

ključne riječi: Energetsko planiranje, EnergyPLAN, Vjetroelektrane, Fotonapon, Republika Hrvatska, CO<sub>2</sub> emisija, Obnovljivi izvori energije, analiza višestrukih kriterija, Pareto analiza



---

**SUMMARY**

While the new 2030 European framework for climate and energy requires a reduction in greenhouse gas emissions by at least 40% compared to the 1990 level, the Republic of Croatia did not tackle the implementation of renewable energy sources like other European countries. In the time when wind plants and photovoltaic systems represent a relatively cheap energy technology, this paper will analyse the influence of construction of wind and photovoltaic power plants in order to present the optimal constructing ratio of such systems on the Croatian power system load. Simulations have been conducted in the EnergyPLAN model for the year 2012. After choosing several promising scenarios, applying the Pareto analysis will show the best scenario for generating electricity from renewables, scenario with the lowest import of electricity, scenario of CO<sub>2</sub> emission and with the lowest critical excess electricity production. Finally, all of the scenarios will be subjected to a multiple criteria decision analysis in order to find the best overall scenario. Analyses have proved that the best parameters were achieved with the scenario that had 1.65 GW of Wind power plants and 1.6 GW of installed PV capacity, which proved that PV will have a bigger role in the Republic of Croatia than expected.

Key words: Energy planning, EnergyPLAN, Wind power plants, Photovoltaic, Republic of Croatia, CO<sub>2</sub> emission, Renewable Energy, Multicriteria-Analysis, Pareto analysis

## 1. UVOD

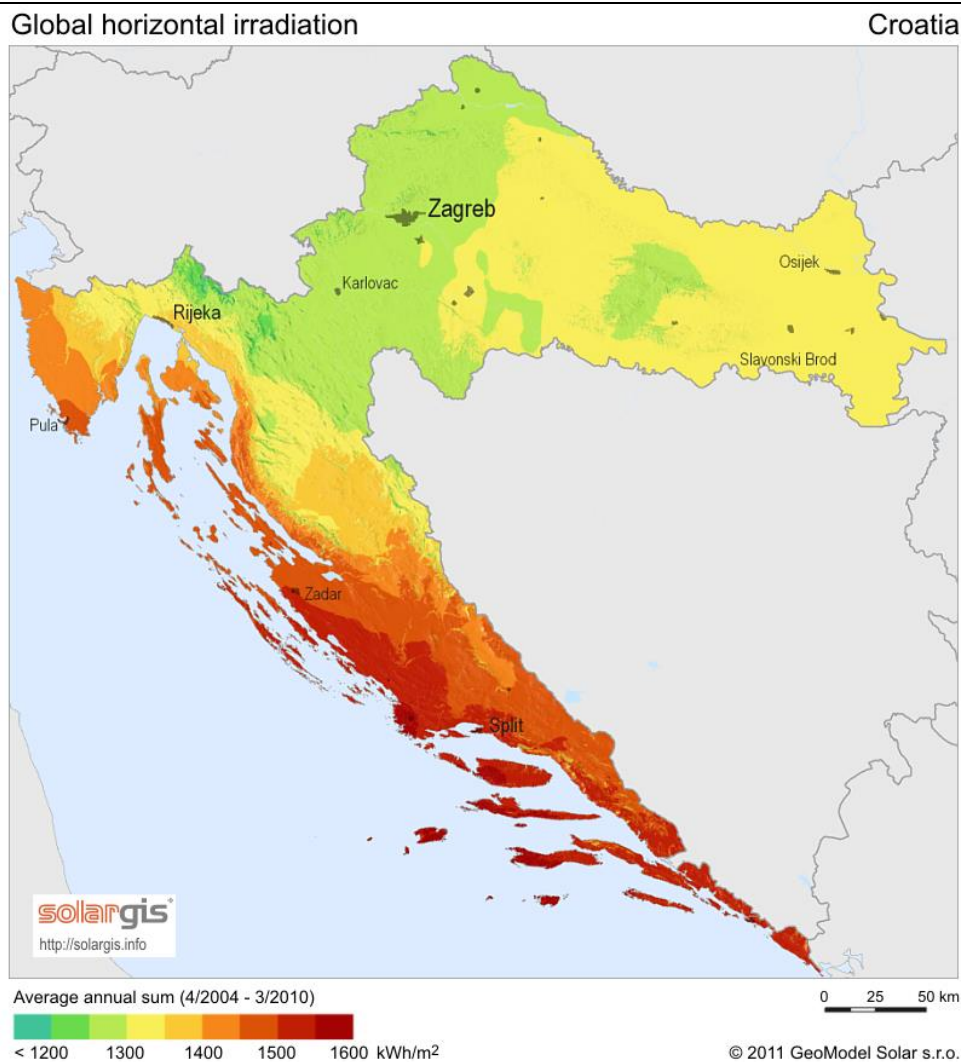
### 1.1. Opis Republike Hrvatske

Republika Hrvatska zauzima površinu od 56.594 km<sup>2</sup> [1]. Graniči na sjeveru sa Slovenijom i Mađarskom, na istoku sa Srbijom, a na jugu s Bosnom i Hercegovinom i Crnom gorom. Na zapadu ima morsku granicu s Italijom. Dugina obalne linije s otocima iznosi 5.835,3 km. Od 1.185 otoka, 47 je nastanjeno [2]. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine, Hrvatska ima 4.284.889 stanovnika [3]. BDP po glavi stanovnika za referentnu 2012. godinu je iznosio 18.100 \$/stanovniku [4]. Klima u sjevernoj Hrvatskoj je umjereno kontinentalna (s vrućim i suhim ljetima te hladnim i vlažnim zimama). U srednjoj Hrvatskoj je potplaninska i planinska klima (svježlja ljeta i oštrije zime) u primorskom dijelu mediteranska, a u zaleđu submediteranska. Na jadranskoj obali vlada mediteranska klima (sa suhim i toplim ljetima te vlažnim i blagim zimama). Primorska Hrvatska, uključujući i cijelu Dalmaciju ima godišnju insolaciju i do 2.700 sati godišnje, dok u nizinska i gorska Hrvatska nema više od 2.000 sunanih sati godišnje [5]. Detaljnije o insolaciji u Hrvatskoj prikazuje slika 1.

Moć se ti e potencijala za vjetroelektrane, vjetrovi nad Jadranom općenito ovise o razdiobi razlike tlakova na širem području. Najčešći vjetrovi na Jadranu su bura (SSI do ISI), jugo (IJI do JJI) i maestral (ZSZ do SZ). Bura je najpoznatiji vjetar za jadransko područje. Puše s kopna na more, traje nekoliko dana, a udaljevanjem od obale slabi. Bura najčešće puše u hladnom dijelu godine i nije povoljna na vjetroelektrane zbog svoje izrazite mahovitosti. Jugo najčešće puše kao jugoistočni vjetar, a pri pozicioniranju vjetroelektrana odabire se lokacija na kojem jugo ne postigne orkansku snagu. Od ostalih vjetrova, pušu i vjetrovi iz smjerova J (jugo), JZ (lebi, garbin), Z (pulenat), S do SZ (tramontana), I (levanat), te vjetrovi obalne cirkulacije (burin ili kopnenjak i zmorac) [6]. Srednja godišnja brzina vjetra grafički prikazuje slika 2.

### 1.2. Energetska situacija u Europskoj uniji

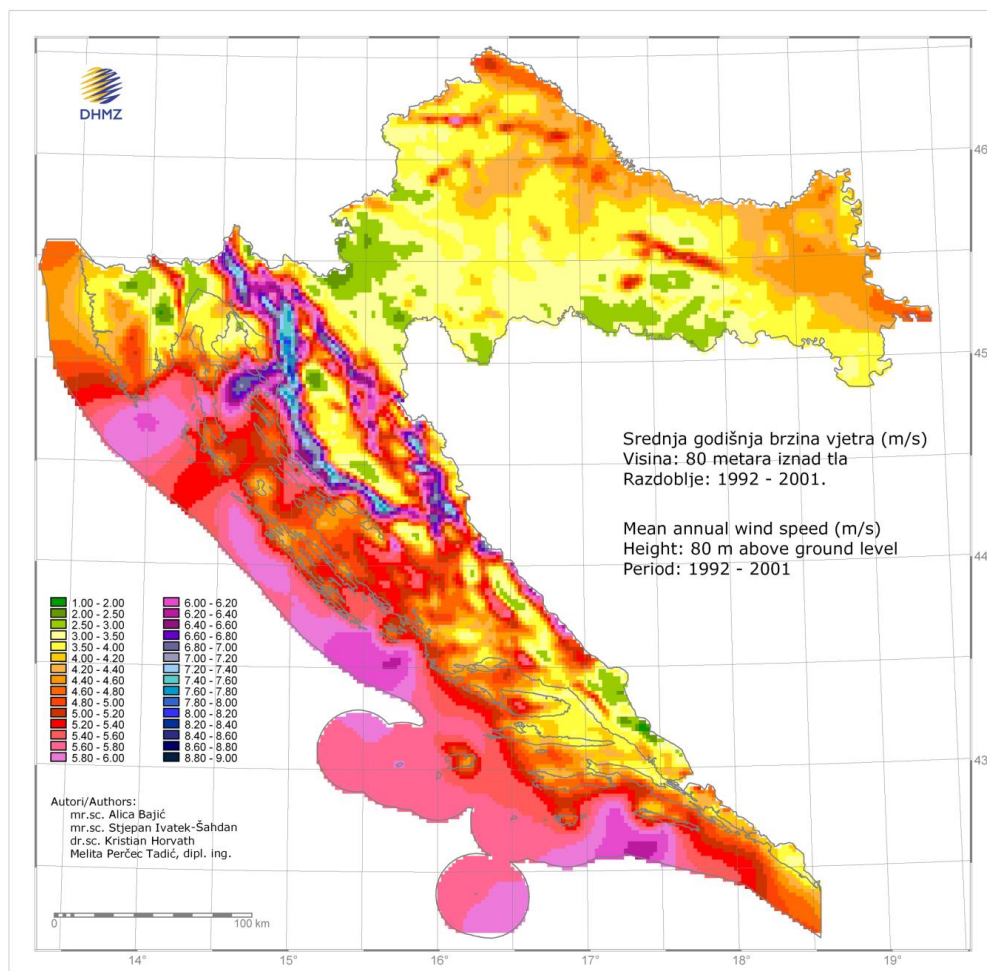
U 2012. godini, uvoz primarne energije za zemlje EU-27 je dostigao razinu od 53,4 %, što je jednako rastu od 20 % od 1995. godine, dok se predviđa da će se povećati na 70 % u idućih 20-30 godina [7]. Kako bi se postigao energetska neovisan sustav, a paralelno snizile CO<sub>2</sub> emisije, Europska unija je postavila nove ciljeve za 2030. i 2050. godinu. Ciljevi uključuju da 27% proizvedene električne energije dolazi iz obnovljivih izvora energije do 2030 [8] i 95% redukcije CO<sub>2</sub> emisije iz energetskog sektora do 2050. godine [9].



Slika 1. Insolacija u Hrvatskoj [10]

Kako bi se smanjio na–uglji ni otisak, razni na ini pristupa su prou eni od velikog broja autora. Dok neki radovi rade analize za itave drflave [11], dosta radova je fokusirano na manje regije, kao –to su otoci [12] i gradovi [13] ili ak odre eni sektori, kao –to su energetske [14], transport [15], stambenom [16] i u nekim slu ajevima i u industriji. Nadalje, neki autori idu korak vi–e tako –to analiziraju scenarije u kojima je mogu e postiti i 100% obnovljive sustave. Takvi radovi su ve napravljeni za Republiku Hrvatsku [17] i druge europske zemlje. Od svih navedenih radova, zaklju ak je kako je potreban scenarijski pristup energetskom planiranju, kao –to i dugoro no planiranje. Stoga je implementacija obnovljivih izvora energija postala imperativ nakon RE-thinking-a 2050 [18]. RE-thinking 2050 poziva na odustajanje od kori –tenja fosilnih goriva, ali ve ina zemalja lanica EU nisu obnovili svoje energetske strategije za 2050. godinu.

Od malobrojnih zemalja koje su već unijele ovaj cilj u svoju energetska strategiju je Danska [19], dok neke zemlje kao što su Njemačka [20] i Irska [21], vjeruju da će ostvariti penetraciju veću od 100% obnovljivih izvora energije u svojim sustavima do 2050. godine.



Slika 2. Atlas vjetra [22]

Značajna implementacija obnovljivih izvora energije je već započela, tako je 2012. godina bila velika godina za obnovljive izvore energije, sa stajališta instaliranih kapaciteta. U EU se izgradilo 11,9 GW novih kapaciteta vjetroelektrana, što predstavlja 26,5% instaliranih radnih kapaciteta, a u protekle dvije godine vjetroelektrane su zabilježile godišnji rast od 11,6% [23]. U 2014. godini se smanjio nagli rast instaliranih kapaciteta vjetroelektrana, to nije na 3,8% u odnosu na 2013. godinu. Instalirani kapaciteti u EU za 2014. godinu su bili 11,8 GW, što rezultira ukupnom brojkom od 128,8 GW vjetroelektrana u EU [24]. S druge strane, fotonaponski sustavi su imali drugi najveći rast u EU u 2014. godini, sa svojih 8 GW su dosegli

ukupnu brojku od 87,9 GW u EU, dok je u Svijetu u istoj godini imao drastičnu ekspanziju sa 38,7 GW, čime je dosegao 177 GW instaliranih kapaciteta [25] i [26].

### 1.3. Energetska situacija u Republici Hrvatskoj

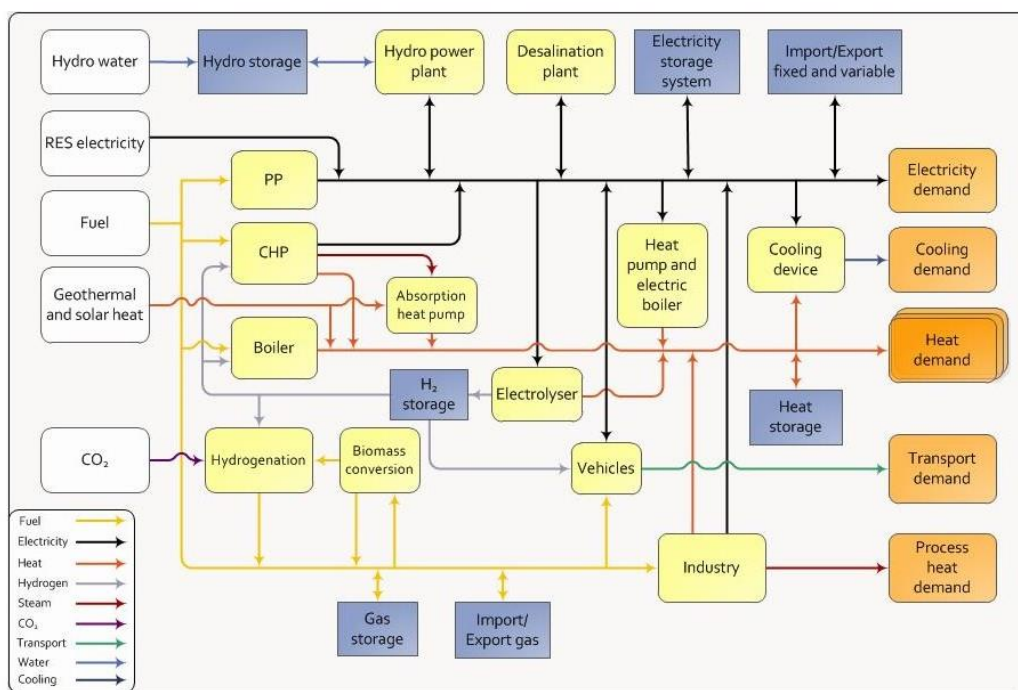
Usporedbu i prethodno navedene podatke, vidi se kako zemlje i slične prirodne potencijalima od Hrvatske, kao što su Belgija i Austrija, bilježe značajni rast instaliranih kapaciteta vjetroelektrana i fotonaponskih sustava u odnosu na Hrvatska. Hrvatska je bilježila porast instaliranih kapaciteta vjetroelektrana sa 136 MW iz 2012. godine na 347 MW u 2015. godini [24]. Fotonaponski sustavi, koji također bilježe veliki rast, u Hrvatskoj su zabilježili porast s 3,95 MW iz 2012. godine na 34 MW u 2015. godini, što je pri samom dnu u cijeloj Europi [25]. Uz sve navedeno, Hrvatska energetska strategija predviđa gašenje svih dosadašnjih termoelektrana koje koriste mazut i ugljen do 2030. godine [27]. Također se tiče hidroelektrana, uzevši u obzir da predstavljaju 45 % proizvedene električne energije u Hrvatskoj tijekom 2012. godine, aludira na činjenicu da treba voditi velikih razina oko hidrologije u budućnosti.

Svrha ovog rada je da prikaže scenarij za hrvatsku energetska strategiju koji će imati najveći utjecaj na smanjenje CO<sub>2</sub> emisije, uvoz električne energije i istovremeno imati najniži kritični višak proizvedene električne energije (CEEP). Nadalje, analize napravljene u ovom radu će pokazati da hrvatski elektroenergetski sustav može primiti više kapaciteta obnovljivih izvora energije nego što je bilo predviđeno s dosadašnjim energetska strategijama, koje su predviđale 1200 MW kapaciteta vjetroelektrana do 2020. godine, a fotonaponske module uopće nisu smatrali financijskim konkurentnima [28]. Prvi korak je razvoj referentnog modela za 2012. godinu i njegova validacija s podacima iz IEA. Nakon toga provesti će se analiza koja će pokazati kako kapaciteti vjetroelektrana i fotonaponskih sustava utječu na kritični višak proizvedene električne energije (CEEP), uvoz električne energije, CO<sub>2</sub> emisije i količinu proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora energije. Ta analiza će biti popraćena Pareto analizom, koja će omogućiti odabir 20 najboljih scenarija. Svi scenariji koji su se podvrgnuli Pareto analizi su optimirani u svojim određenim područjima. Na kraju, scenariji koji su dobiveni nakon Pareto analize će se pomoću analize višestrukih kriterija svesti na jedan optimalni scenarij.

## 2. METODOLOGIJA

### 2.1. EnergyPLAN

Kako bi se analizirali i usporedili postojeći i scenariji za Hrvatsku, korišten je program EnergyPLAN koji služi za modeliranje regionalnih i nacionalnih energetskih sustava. Program je razvijen na Sveučilištu u Aalborgu, u Danskoj, a trenutno je besplatan [29]. Detaljna dokumentacija i mogućnost preuzimanja je dostupna na [www.energyplan.eu](http://www.energyplan.eu). EnergyPLAN se koristi za različite studije energetskih sustava na lokalnoj, nacionalnoj i regionalnoj razini. Od nekih primjera se mogu navesti Danska [30], Irska [31], Makedonija [32], Kina [33] i Ujedinjeno Kraljevstvo [34]. Njegov ulazno/izlazni model se sastoji od tri sektora: električna energija, toplinska energija i transport, kao što prikazuje slika 3.



Slika 3. Shematski prikaz EnergyPLAN programa

Osim toga valja napomenuti kako program radi na satnoj bazi kako bi se optimizirala operacija sustava. Ulaz se sastoji od instaliranih kapaciteta termoelektrana, proizvodnje i distribucije, električne i toplinske energije. Izlaz uključuje energetske bilance u dobavi primarne energije (PES), udjelu obnovljivih izvora energije (RES), emisija, uvoza-izvoza električne energije te kritičnog viška proizvedene električne energije (CEEP).

### 2.1.1. Regulacijske strategije

U sklopu programa, treba se odabrati između tehničke i tržišne regulacijske strategije.

Regulacijska, tj. optimizacijska strategija određuje ponašanje EnergyPLAN modela te tako značajno utječe na rezultate koje model na kraju prikazati, stoga prije opisa potrebnih ulaznih podataka potrebno je opisati glavne regulacijske strategije modela. EnergyPLAN model nudi dvije glavne regulacijske strategije – tehničku i tržišnu optimizaciju. Tehnička regulacija pokušava smanjiti uvoz i izvoz električne energije te potrošnju goriva. Tržišna regulacija optimira rad svakog postrojenja s obzirom na ekonomske faktore kao što su cijena električne energije na tržištu, troškovi goriva, porezi, cijene emisija CO<sub>2</sub>, troškovi rada i održavanja i slično. Model ima ukupno četiri tehničke regulacijske podstrategije i tri tržišne podstrategije. Najčešće upotrebljavanje strategije prilikom analiza su:

1. Tehnička regulacija uz balansiranje zahtjeva za toplinskom energijom – vrsta regulacije pri kojoj kogeneracijska postrojenja rade isključivo u skladu s potrebom za toplinskom energijom.
2. Tehnička regulacija uz balansiranje zahtjeva za električnom i toplinskom energijom – vrsta regulacije pri kojoj kogeneracijska postrojenja rade u skladu s potrebama za oba navedena oblika energije.
3. Tržišna regulacijska strategija bez limita – vrsta regulacije gdje se optimizacija postrojenja temelji na ekonomskom marginalnom trošku proizvodnje.

Tržišna regulacijska strategija pokušava pronaći financijski najpovoljnije rješenje za zadovoljavanje potreba sustava uz podatke cijene na tržištu električne energije na kojem sva postrojenja teže povećanju profita. Različite skupine elektrana (nuklearne, geotermalne, kondenzacijske i različite vrste kogeneracijskih elektrana) se razvrstavaju s obzirom na marginalne troškove proizvodnje. Svaka od skupina se zatim optimira s obzirom na cijenu električne energije na tržištu, uzimajući u obzir i kretanja cijene u ovisnosti o trenutnoj potražnji.

Prilikom optimiranja u tržišnoj regulaciji, model postavlja i gornje granice proizvodnje pokušavajući i definirane izvozne kapacitete sustava. Ukoliko ne uspije u tome, nastaje višak proizvedene električne energije, koji se ne može izvesti te se stvara usko grlo (eng. bottleneck) koje model pokušava riješiti tako da razdvoji cijenu na vanjskom i unutarnjem

trfi-tu te za unutarnje trfi-te definira cijenu kao marginalni proizvodni tro-ak postrojenja koje je dovelo do nastanka grla. Ako to ne rije-i problem, dolazi do tzv. kriti nog vi-ka proizvedene elektri ne energije. esto se za ovu energiju koristi i akronim CEEP, od engleskog naziva šcritical excess electricity production. Model ovu energiju opisuje kao razliku izme u ukupnog prora unatog izvoza i definiranog kapaciteta izvoza, tj. svojevrsni vi-ak izvezene elektri ne energije. U stvarnosti se naravno mođe izvesti samo onoliko energije koliko to mređa dopu-ta pa je pojava kriti nog vi-ka proizvedene elektri ne energije izuzetno opasna i mođe dovesti do promjene frekvencije mređe i pada sustava. Ukoliko model uspije rije-iti usko grlo ranije spomenutom promjenom cijene, sustav se vra a u normalan rad u kojem su cijena na vanjskom i unutarnjem trfi-tu jednaka. U slu aju suprotnom ranije opisanom - kada uvoz elektri ne energije prema-i definirane kapacitete, model kompenzira pove anjem proizvodnje iz kondenzacijskih elektrana

Osnovna razlika u na inu kori-tenja trfi-ne i tehni ke regulacije dolazi do izrađaja kod elektrana s visokim pogonskim tro-kovima, kao -to su elektrane na mazut. Tehni ka regulacija upotrebljava elektrane bez obzira na visoku cijenu, dok ih trfi-na koristi samo u ekstremnim slu ajevima, -to i vi-e odgovara na inu rada takvih elektrana [35]. Za ovaj rad se koristila tehni ka regulacija s regulacijom toplinske i elektri ne energije u kojoj nisu uklju ene elektrane na mazut, kako bi se izme u ostalog minimizirao vi-ak proizvedene elektri ne energije (CEEP). Detaljnije informacije o pona-anju i postavkama tehnologija za obje vrste regulacijskih strategija se mogu prona i u priru niku programa [36].

## 2.2. Distribucijske krivulje

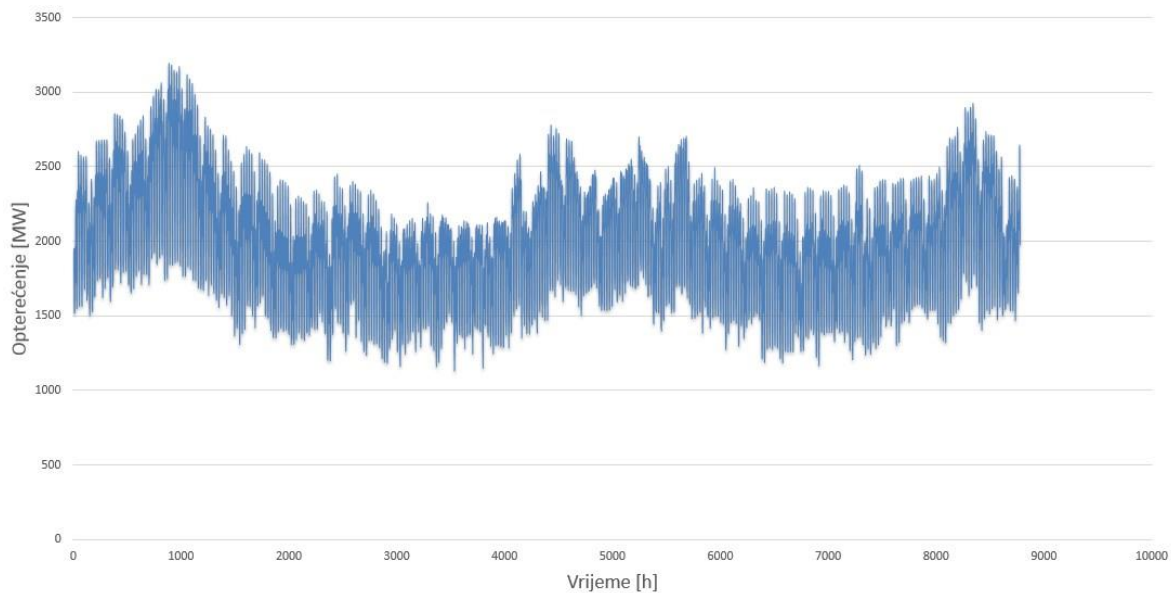
Kao -to je ranije navedeno, za rad u programu EnergyPLAN potrebno je izraditi satne distribucijske krivulje toplinskog optere enja, krivulje snage vjetra, krivulje snage proto nih i akumulacijskih hidroelektrana i krivulja potro-nje elektri ne energije za 2012. godinu. U sklopu ovog rada bilo je potrebno modelirati odgovaraju e krivulje koje e u kombinaciji s podacima o sada-njem stanju sustava dati model koji nakon usporedbe s poznatim podacima za baznu godinu mođemo proglasiti valjanom osnovom za daljnje prora une. Krivulje se unose u EnergyPLAN u obliku tekstualne datoteke i sastoje se od 8.784 satnih vrijednosti.

Model tako er nudi i korekcijske faktore koji pomafu priblifiti rezultate prora una stvarnim vrijednostima. Detalji i postupci izrade potrebnih krivulja biti e poblifile opisani na primjeru Hrvatske u sljede im paragrafima.



### 2.2.1. Krivulja potrošnje električne energije

Podaci za potrošnju električne energije dobili su se sa stranice ENTSO-e [37], a razdioba te potrošnje se vidi na slici 4. Tako er treba napomenuti kako na slici 4 nisu vidljive karakteristične dnevne pojave unutar elektroenergetskog sustava, kao što su povećana potrošnja u jutarnjim satima prije i neposredno nakon dolaska na posao, popraćena blagom stagnacijom i padom u poslijepodnevним satima, a zatim ponovnim rastom nakon povratka stanovništva s posla i u večernjim satima, te naposljetku ponovni pad potrošnje preko noći. Pošto je izvedena na godišnjoj bazi, slika 4 pokazuje kako potrošnja električne energije raste tijekom zime i ljeta. Razlog rasta opterećenja ljeti na 2.700 MW je uzrokovano priljevom turista, koji sami time povećavaju broj ljudi koji troše električnu energiju, a drugi razlog je korištenje uređaja za hlađenje koji se pokreću na električnu energiju.



Slika 4. Satna krivulja potrošnje električne energije

S druge strane, u zimskim periodima vidimo povećanje potrošnje opterećenja i na 3.200 MW, koje pokazuje kako značajni postotak stanovništva koristi električnu energiju za grijanje.

### 2.2.2. Krivulja uvoza i izvoza električne energije

EnergyPLAN nudi opciju definiranja fiksne količine električne energije koja će se tijekom godine uvesti ili izvesti iz sustava, te traži krivulju koja će opisivati opterećenje prijenosnih kapaciteta za tu količinu energije. Ova opcija je posebno korisna u slučaju kada država izvozi

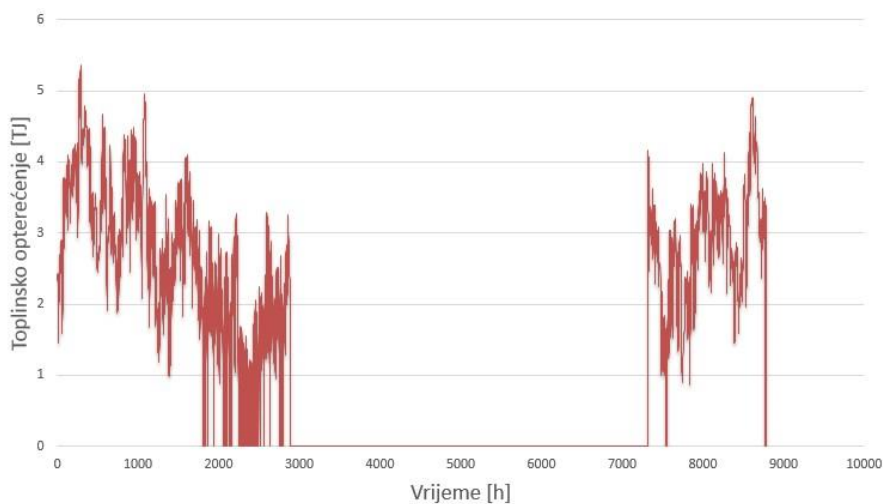
ili uvozi velike količine električne energije prema unaprijed definiranim uvjetima, ili kada, kao u slučaju Hrvatske, ima proizvodne kapacitete van zemlje. Tu se naravno radi o nuklearnoj elektrani Krško koja je u 50% vlasništvu RH. Zbog samog principa rada nuklearne elektrane, kojoj pogoduje bazni način rada, male promjene u opterećenju i sl., za krivulju je odabrana pretpostavljena konstantna krivulja koja dolazi s modelom, a predviđa da će se zadana količina energije ravnomjerno raspodijeliti kroz cijelu godinu, tj. da će elektrana cijelu godinu raditi pod jednakim opterećenjem.

### 2.2.3. Krivulja satnog toplinskog opterećenja

Od ostalih bitnih krivulja je krivulja toplinskog opterećenja. Ona je dobivena uz pomoć računalnog programa METEONORM [38]. Uzevši usrednjene satne vrijednosti temperature vanjskog zraka za Zagreb, Split i Osijek, s pretpostavljenom temperaturom prostorije od 21 °C, razlika unutarne i vanjske temperature u svakom satu stupanj sati.

Podatak o ukupnoj potrošnji toplinske energije se dobilo sa stranice Međunarodne energetske agencije (IEA). Satno toplinsko opterećenje se dobije tako što se ukupna potrošnja toplinske energije podijeli sa sumom svih stupanj sati u godini te pomnoži s pripadajućim stupanj-satom. Rezultati tog jednostavnog proračuna se vide na slici 5.

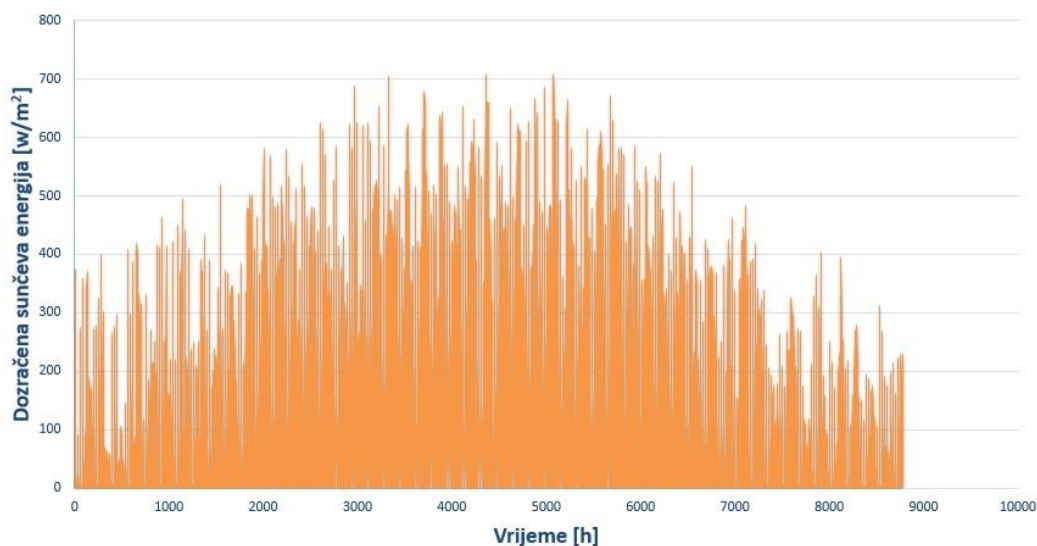
Razdioba grijanja na slici 5 pokazuje kako toplinsko opterećenje u prosincu i siječnju može dosegnuti, a nekad i prekoračiti 5 TJ.



Slika 5. Satna krivulja toplinskog opterećenja

### 2.2.4. Krivulja dozačenosti sunčeve energije za fotonaponske module

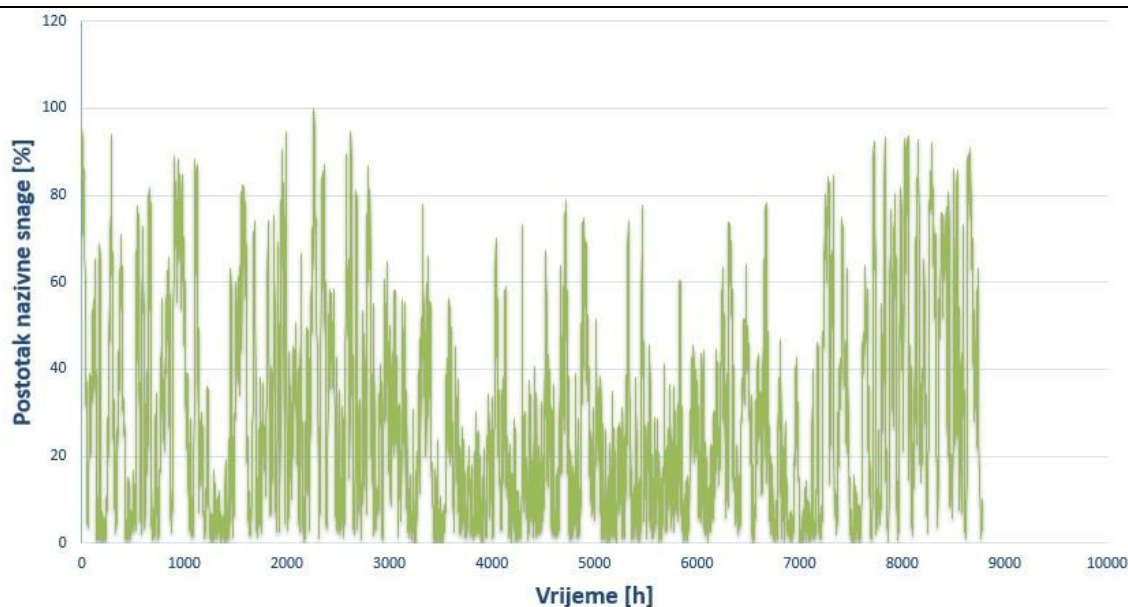
Kada se govori o proizvodnji električne energije iz fotonaponskih modula, glavni faktor je naravno količina sunčevog zračenja. Za krivulju dozačenosti se ponovno koristio program METEONORM koji za ista tri grada daje satne podatke dozačenosti pod optimalnim kutom u  $\text{W/m}^2$ . Grafički rezultat dobivenih vrijednosti se vidi na slici 6. Pretpostavlja se da će proizvodnja iz fotonaponskih modula biti proporcionalna zračenju te se dobivene vrijednosti osrednjuju tako da se za svaki grad računa srednja vrijednost zračenja na horizontalnu plohu i plohu pod optimalnim kutom, a zatim iz tih vrijednosti računa srednja vrijednost na razini države.



Slika 6. Dozračena količina sunčeve energije za fotonaponske module

### 2.2.5. Krivulja proizvodnje energije iz vjetroelektrana

Za proizvodnju energije iz vjetroelektrana se koristila postojeća krivulja u EnergyPLAN-u za vjetar u Dalmaciji jer je logično pretpostaviti da će se vjetroelektrane graditi na mjestima gdje postoji potencijal za vjetroelektrane, a ne na lošijim lokacijama u unutrašnjosti. Navedena krivulja je grafički prikazana na slici 7, koja pokazuje koliko postotak nazivne snage vjetroelektrane radi u određenom satu, tj. koji je njen omjer stvarne proizvodnje i njene nazivne proizvodnje.



**Slika 7. Krivulja postotka nazivne snage vjetroelektrana u Dalmaciji**

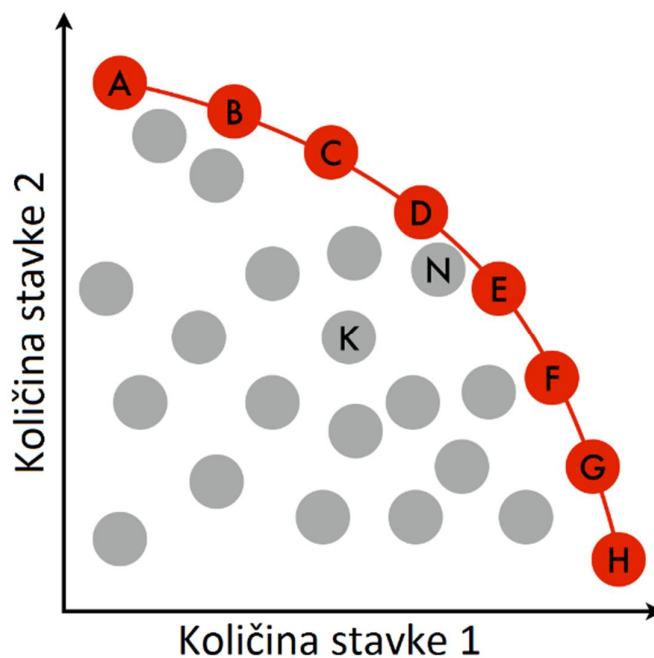
Iako postotak nazivne snage nekad bude i ispod 10%, značajniji je podatak kako postotak nazivne snage često bude preko 40%, što je – jednom dokazuje dobar vjetropotencijal u Dalmaciji.

### **2.3. Scenarijski pristup**

Uzevši u obzir da će se sve analize provesti za 2012. godinu, nije potrebno razmatranje novih satnih podataka za potrošnju električne i toplinske energije. Zbog specifičnog rada EnergyPLAN-a on ne može sam po sebi optimirati vrijednosti fotonaponskih sustava i vjetroelektrana, a da istovremeno pokazuje željene rezultate, već jedna od ovih tehnologija treba biti konstantna. Primjer je kada se kapacitet vjetroelektrana povećava sa 100 MW do 3 GW, tada druga tehnologija, u ovom slučaju fotonaponski moduli moraju ostati konstantni. Zbog toga će ovaj rad imati dva velika bloka scenarija, jedan kod kojeg su vjetroelektrane konstantne dok se fotonaponski sustavi mijenjaju. Drugi scenarij će biti obrnut, gdje fotonaponski sustavi ostaju konstantni, a instalirani kapacitet vjetroelektrana se mijenja. Svaki od ova dva velika bloka scenarija će se podvrgnuti daljnjim analizama kako bi se pronašao optimalni scenarij za elektroenergetski sustav.

## 2.4. Pareto analiza

Mnogo problema u strojarstvu zahtjeva optimizaciju. Jedan od primjera je ovaj rad, gdje je potrebna optimizacija kapaciteta vjetroelektrana i fotonaponskih sustava, stoga je potrebno odabrati jedno rješenje od višeg ponuđenih. Tipičan scenarij u optimizacijskom području ima više od jednog cilja kojeg je potrebno optimizirati istovremeno, što rezultira da se ti ciljevi međusobno u sukobu. Razlika između optimizacije s jednim ciljem i višestrukim ciljevima se može objasniti kroz jedan jednostavan primjer. U slučaju optimizacije s jednim ciljem, gdje je cilj optimizirati totalnu cijenu sistema, rješenje će biti scenarij koji postigne najnižu cijenu. Stoga u ovom slučaju samo je jedno rješenje točno (uz pretpostavku da dva različita rješenja nemaju istu cijenu). S druge strane ako se razmotri optimiranje s više ciljeva, trebaće istovremena optimizacija. Ako su ti ciljevi u stalost pada sustava i cijena sustava, optimalno rješenje će biti ono koje postigne najmanju u stalost pada sustava za najnižu cijenu sustava. Međutim takvo rješenje uglavnom ne postoji jer je optimiranje jednog cilja proporcionalno drugom cilju. Pitanje je odrediti koje je od dva rješenja s različitim vrijednostima je bolje. Odgovor je da su oba točna. Oba slučaja se smatraju optimalnim. Primjer takvog scenarija se vidi na slici 8, gdje crvena krivulja predstavlja sva optimalna rješenja. Ovakav način dobivanja rješenja naziva se Pareto fronta ili Pareto efikasnost.



Slika 8. Shematski prikaz Pareto analize [39]

### 3. REZULTATI

#### 3.1. Analiza energetske bilance Republike Hrvatske

Koriste i se podacima ministarstva gospodarstva, analizirana je energetska bilanca Republike Hrvatske za 2012. godinu. Termoelektrane koje su trenutno aktivne u Republici Hrvatskoj i služe za proizvodnju električne i toplinske energije navedene su u tablici 1 [40]

**Tablica 1. Popis termoelektrana u RH**

| Naziv elektrane | Nazivna snaga (MW) | Snaga na pragu (MW) |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| EL-TO Zagreb A  | 12,5               | 9                   |
| TE Sisak A      | 210                | 198                 |
| TE Plomin A     | 105                | 93                  |
| TE-TO Osijek A  | 25                 | 23,5                |
| TE-TO Osijek B  | 25                 | 23,5                |
| KTE Jertovec A  | 42,5               | 37                  |
| KTE Jertovec B  | 42,5               | 37                  |
| TE-TO Zagreb C  | 110                | -                   |
| TE-TO Osijek A  | 45                 | 42                  |
| TE Sisak B      | 210                | 198                 |
| EL-TO Zagreb B  | 32                 | 26                  |
| TE Rijeka       | 320                | 303                 |
| EL-TO Zagreb A  | 25,6               | -                   |
| EL-TO Zagreb B  | 25,6               | -                   |
| TE-TO Zagreb K  | 210                | -                   |

Budu i da ovaj rad koristi tehniku regulaciju, potrebno je u EnergyPLAN unijeti samo termoelektrane koje rade tijekom godine na duži period, a to su samo neke od navedenih u tablici 1, rezultiraju i s ukupno 616 MW koji se koristi u modelu kako bi se prikazala prava situacija u elektroenergetskom sustavu Republike Hrvatske.

Ključni podaci iz energetske bilance električne energije u Hrvatskoj u 2012. godini su prikazane u tablici 2.

**Tablica 2. Energetska bilanca električne energije**

| Način proizvodnje   | Kapaciteti (MW) | Proizvodnja (GWh) |
|---------------------|-----------------|-------------------|
| Hidroelektrane      | 2166            | 4801              |
| Vjetroelektrane     | 136             | 328,7             |
| Fotonaponski moduli | 3,95            | 2,4               |
| NE Krško            | 348             | 2,621             |
| Uvoz                | -               | 9230,8            |
| Izvoz               | -               | 1601,8            |

### 3.2. Bazna godina

Nakon napravljene analize energetske bilance, sljedeći je korak izrada modela referentne 2012. godine u EnergyPLAN-u. Podaci dobiveni iz tog modela moraju biti unutar 5% rezultata koji se mogu naći od Međunarodne energetske agencije (IEA) za 2012. godinu.

#### 3.2.1. Potrošnja električne energije (*Electricity - Demand*)

Jedan od najvažnijih problema kod modeliranja bazne godine je upravo u određivanju zahtjeva za električnom energijom te uvoza, tj. izvoza električne energije. Hrvatski elektroenergetski sustav odlikuje velika ovisnost o uvozu električne energije. Od ukupno 18,19 TWh potrošene električne energije u 2012., čak 9,23 TWh došlo je iz uvoza. Doduše, valja imati na umu da se hrvatski udio u NE Krško u evidencijama također tretira kao uvezena električna energija, a u 2012. godini je taj udio iznosio 2,621 TWh električne energije. Ipak, zbog promjenjive potrošnje te velikog udjela hidroelektrana u sustavu, postoji i izvoz električne energije, a u 2012. je iznosio 1,601 TWh [40]. Kako nisu bili dostupni podatci o satnim vrijednostima uvoza i izvoza električne energije, problem je riješen tako da je kao iznos potrošnje električne energije postavljena suma potrošnje i izvoza umanjena za iznos uvoza. Tako je u ovoj kartici šElectricity demand za 2012. u EnergyPLAN-u iznosio 10,557 TWh, a šFixed Import/Export 2,621 TWh. Spomenute vrijednosti su zatim vezane uz krivulju potrošnje električne energije, pošto satni podatci za uvoz i izvoz nisu bili dostupni. Nuklearna elektrana Krško je također uvrštena u

kategoriju uvoza, jer se pokazalo da podatci daju bolji odziv pri krivulji potrošnje električne energije nego pri korištenju konstantnog opterećenja (koje bi bilo logično za NE) uz elektranu u sustavu, a ne u uvozu.

### **3.2.2. Toplinsko opterećenje (Heating - Demand)**

U ovoj kartici programa, od nas se traže podatci o toplinskom sustavu, podijeljenom na individualno grijanje, mala kogeneracijska postrojenja, te velika kogeneracijska postrojenja s mogućnošću u kondenzacije. Valja naglasiti kako se usprkos nazivu, u ovu tablicu upisuju i glavni proizvođači elektroenergetskog sustava. Cijelom karticom upravlja krivulja satnog toplinskog opterećenja. Kao male toplane su pobrojane sve toplane bez kogeneracije u Hrvatskoj, koje namiruju toplinsku potrošnju od 0,744 TWh u 2012. Spomenute elektrane promatrane su kao jednostavna kotlovska postrojenja efikasnosti 80%. U kategoriju malih kogeneracijskih postrojenja nije svrstano niti jedno postrojenje, već su termoelektrane svrstane u velika kogeneracijska postrojenja, dok je za termoelektrane-toplane pretpostavljeno da rade kao kondenzacijske termoelektrane. Tako je u 2012. godini, ukupno toplinsko opterećenje bilo 2,48 TWh, a efikasnost proizvodnih postrojenja bila je 90 %.

### **3.2.3. Obnovljivi izvori energije (Supply - Electricity only)**

U ovoj kartici potrebno je unijeti proizvodnju te raspoložive kapacitete obnovljivih izvora energije, kao i krivulje za iste. Prema podacima iz tablice 2, u Hrvatskoj je u 2012. godini bilo instalirano 136 MW vjetroelektrana, 453,9 MW protonih hidroelektrana te 3,95 MW fotonaponskih elektrana. Ti podatci su povezani s krivuljama za proizvodnju iz vjetroelektrana, proizvodnju iz protonih hidroelektrana te proizvodnju iz fotonaponskih modula, dok je u slučaju protonih elektrana bilo potrebno upotrijebiti korekcijski faktor koji EnergyPLAN pruža, kako bi proračunata proizvodnja odgovarala realnim podacima. Iz protonih elektrana tako je proizvedeno 1,68 TWh, iz vjetroelektrana 0,32 TWh, a iz solarnih elektrana manje od 10 GWh. U istoj kartici valja unijeti i akumulacijske hidroelektrane, čija je ukupna nazivna snaga 1711,5 MW, te dobavu vode.

### **3.2.4. Pohrana električne energije (Balancing and Storage)**

U kartici *electricity storage*, kartica se odnosi samo na postavljanje stanja za reverzibilne hidroelektrane. Prema stanju u 2012. godini [40], postoje i reverzibilne hidroelektrane imale



su nazivnu snagu pumpi od 257,1 MW te 293,1 MW nazivne snage turbina, a dodijeljeni su im koeficijenti efikasnosti od 0,8 te 0,9. Ukupni kapacitet skladišta električne energije je postavljen na 26,8 GWh.

U kartici *electric grid stabilisation requirements*, koja služi za balansiranje elektroenergetskog sustava, potrebno je staviti 202 MW kao minimum kapaciteta termoelektrana koje uvijek moraju raditi.

### 3.3. Provjera bazne godine

Nakon što se unesu svi podaci potrebni za model, rezultati koji su prikazani u tablici 3, trebaju korespondirati podacima Meunarodne energetske agencije (IEA) za 2012. godinu, koji su prikazani također u tablici 3.

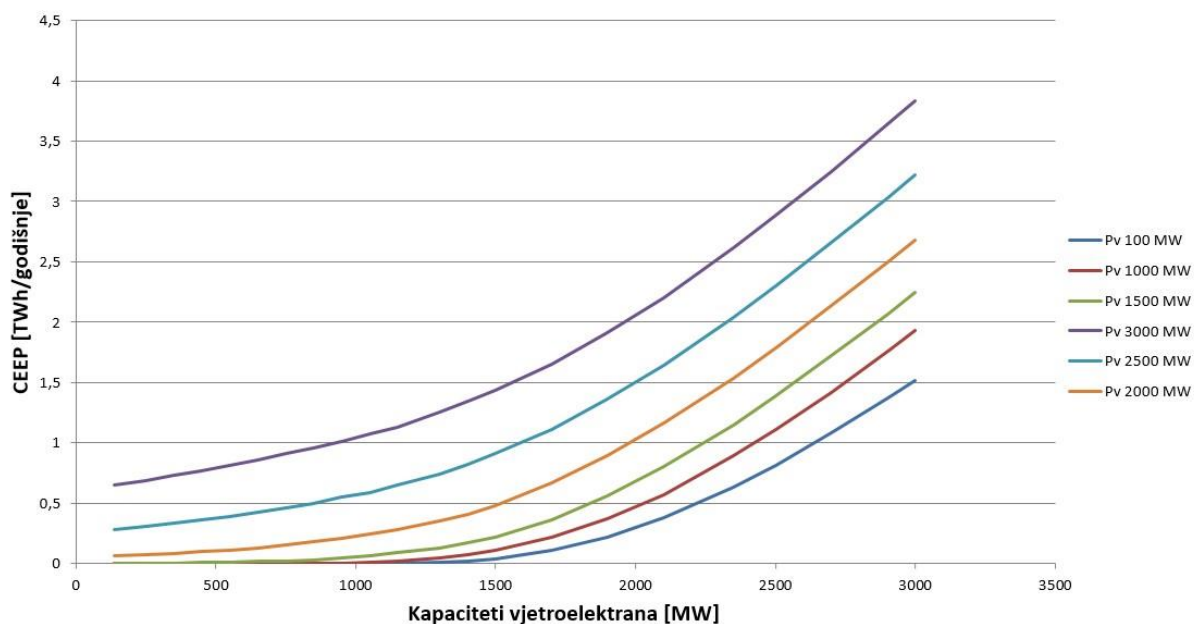
**Tablica 3. Rezultati modela bazne 2012. godine**

| Kriterij                    | Rezultat EnergyPLAN modela za 2012. godinu | Podaci Meunarodne energetske agencije (IEA) | Postotak razlike |
|-----------------------------|--|---|------------------|
| Proizvodnja hidroelektrana  | 4800 GWh                                   | 4801 GWh                                    | 1 %              |
| Proizvodnja vjetroelektrane | 320 GWh                                    | 329 GWh                                     | 3 %              |
| Proizvodnja termoelektrana  | 5330 GWh                                   | 5331 GWh                                    | 1 %              |
| CO <sub>2</sub> emisije     | 16,85 Mt                                   | 17,19 Mt                                    | 2 %              |

Nakon usporedbe u tablici 3, vidi se kako rezultati modela odgovaraju statističkim podacima iz 2012. godine, što znači da se ovim krivuljama koriste za referentne scenarije koje nastaviti analiza energetskog sustava RH.

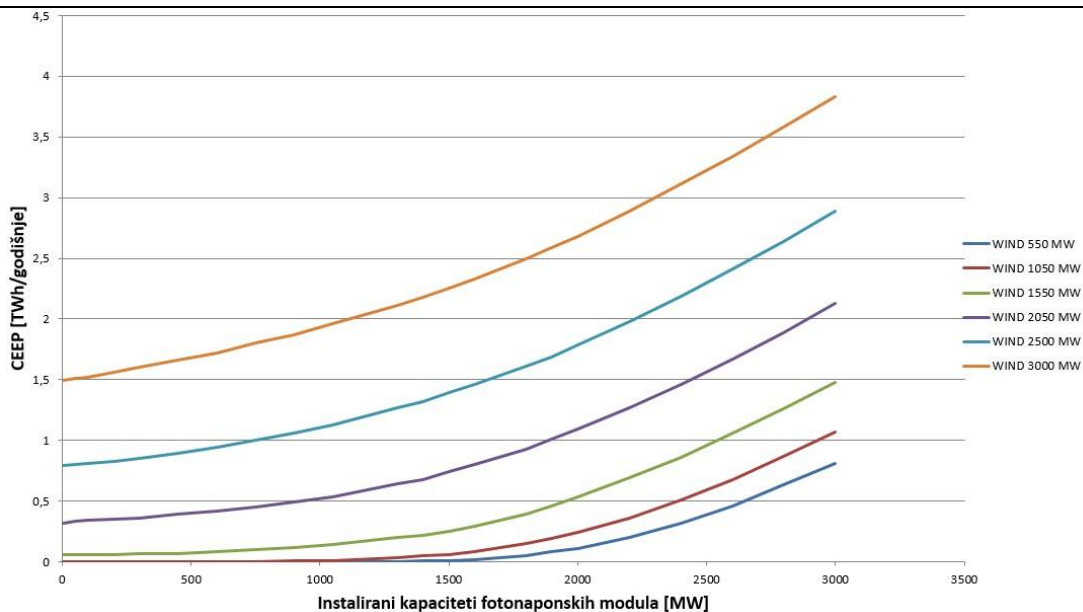
### 3.4. Izrada scenarija

Analizom različitih penetracija vjetroelektrana i fotonaponskih modula i njihovih utjecaja na CEEP, CO<sub>2</sub> emisije, uvoz električne energije i RES proizvodnje, izvela su se kroz 70 scenarija. U slučaju kada su vjetroelektrane konstantna tehnologija, kapacitet vjetroelektrane se mijenjao od referentnih 136 MW do 3000 MW s korakom od 100 MW do 1.300 MW, a zatim s korakom od 200 MW nakon 1300 MW do 3.000 MW. S druge strane, fotonaponski moduli su se povećavali od 3,95 MW do 3000 MW te se tako generiralo 40 scenarija. Sukladno s time, u drugom velikom bloku scenarija, kada su fotonaponski moduli konstantna tehnologija, instalirana snaga fotonaponskih modula se povećava od 3,95 MW do 3.000 MW s istim koracima, dok se vjetroelektrane mijenjaju od 136 MW do 3.000 MW kroz 30 scenarija. Rezultati dobiveni za različite penetracije vjetroelektrana i fotonaponskih modula pokazali su kako obje tehnologije imaju slično ponašanje u slučaju CEEP-a, što se može vidjeti u slikama 9 i 10.



Slika 9. Rast CEEP-a u ovisnosti o instaliranim kapacitetima vjetroelektrana

Iz slike 9 se vidi kako rast instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora energije uzrokuje viši CEEP, što je i njegov glavni razlog pojave. Stoga se zaključuje kako je CEEP neizbježan, ali je potrebno naći slučaj u kojem će on biti u dopuštenim granicama.

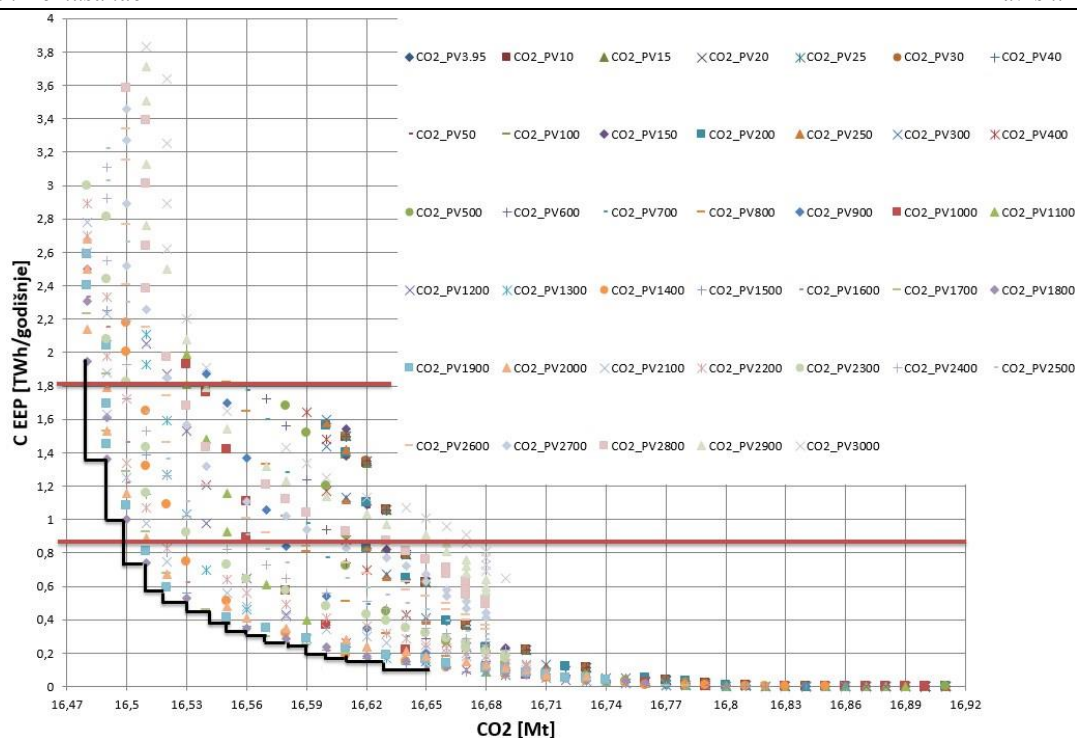


**Slika 10. Rast CEEP-a u ovisnosti o instaliranim kapacitetima fotonaponskih modula**

Iako se na prvi pogled slika 9 i slika 10 ine istima, postoji zna ajna razlika. Na slici 10 za ve u koli inu instaliranih vjetroelektrana nego fotonaponskih modula rezultira nišim CEEP-om. Ova injenica ve diktira kako e optimalni scenarij imati vi-e MW vjetroelektrana nego fotonaponskih modula. Kako bi se provela Pareto analiza, rezultati dvaju velikih blokova scenarija su stavljeni u odvojene dijagrame, kao –to je prikazano na slikama 11 i 12.

### 3.5. Primjena Pareto analize

Nakon –to su rezultati postavljeni u dijagram, Pareto analiza se koristi i svi optimalni scenariji se nalaze na crnoj krivulji na slikama 11 i 12. Pareto analiza se koristila samo za slu aj kada CEEP predstavlja manje od 10% ukupne potro–nje elektri ne energije (gornja crvena linija na slikama 11 i 12). Posebno interesantni rezultati e biti niše od linije koja predstavlja kada je CEEP 5 % ukupne potro–nje elektri ne energije (donja crvena linija na slikama 11 i 12) jer se tih 5 % smatra dozvoljena koli ina CEEP-a jer se ona moše regulirati kroz mrežu ili eventualno izvozom. Slika 11 pokazuje blok scenarija kada su kapaciteti fotonaponskih modula konstantne vrijednosti. Rezultati iz te slike prikazuju kako scenariji kod kojih su kapaciteti fotonaponskih modula 1700 MW i 1900 MW najbolji scenariji za odnos CEEP-a i CO<sub>2</sub> emisije.



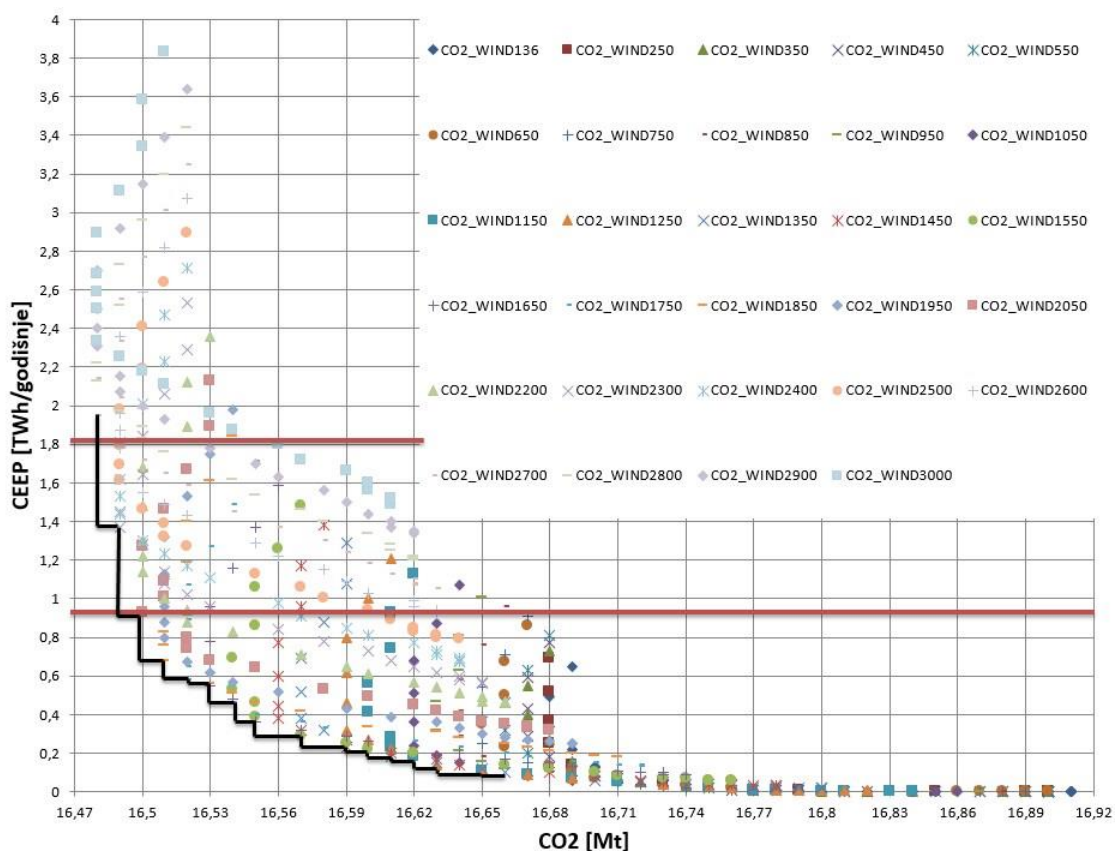
Slika 11. Pareto analiza scenarija kada su fotonaponski moduli konstantni

Jasno je kako pove anjem kapaciteta obnovljivih izvora energije raste CEEP, a istovremeno se smanjuju i CO<sub>2</sub> emisije. Iz toga se mođe zaklju iti kako e najbolji optimalni scenariji biti u donjem lijevom kutu slike 11. Detaljniji prikaz nekih od optimalnih scenarija se mođe vidjeti u tablici 4.

Tablica 4. Optimalni scenariji za CEEP-CO<sub>2</sub> graf kada su kapaciteti fotonapona konstantni

| Kapacitet VE [MW] | Kapacitet fotonapona [MW] | CEEP (TWh/god) | Uvoz (TWh/god) | RES (TWh/god) | CO <sub>2</sub> emisije (Mt) |
|-------------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 2350              | 1800                      | 1,36           | 1,36           | 12,96         | 16,49                        |
| 2100              | 1800                      | 1              | 2,21           | 12,36         | 16,5                         |
| 1900              | 1800                      | 0,74           | 2,4            | 11,89         | 16,51                        |
| 1700              | 1900                      | 0,59           | 2,55           | 11,55         | 16,52                        |
| 1700              | 1800                      | 0,53           | 2,62           | 11,41         | 16,53                        |
| 1700              | 1700                      | 0,46           | 2,68           | 11,27         | 16,54                        |
| 1500              | 1900                      | 0,41           | 2,79           | 11,08         | 16,55                        |
| 1500              | 1800                      | 0,35           | 2,85           | 10,93         | 16,56                        |

Prate i isti princip kao iz slike 11, slika 12 je pokazala rezultate za konstantan iznos kapaciteta vjetroelektrana. U ovom slučaju su rezultati bili igranog spektra, pokazuju i da je nekolicina scenarija optimalna dok je kapacitet vjetroelektrana između 1550 MW i 2300 MW.

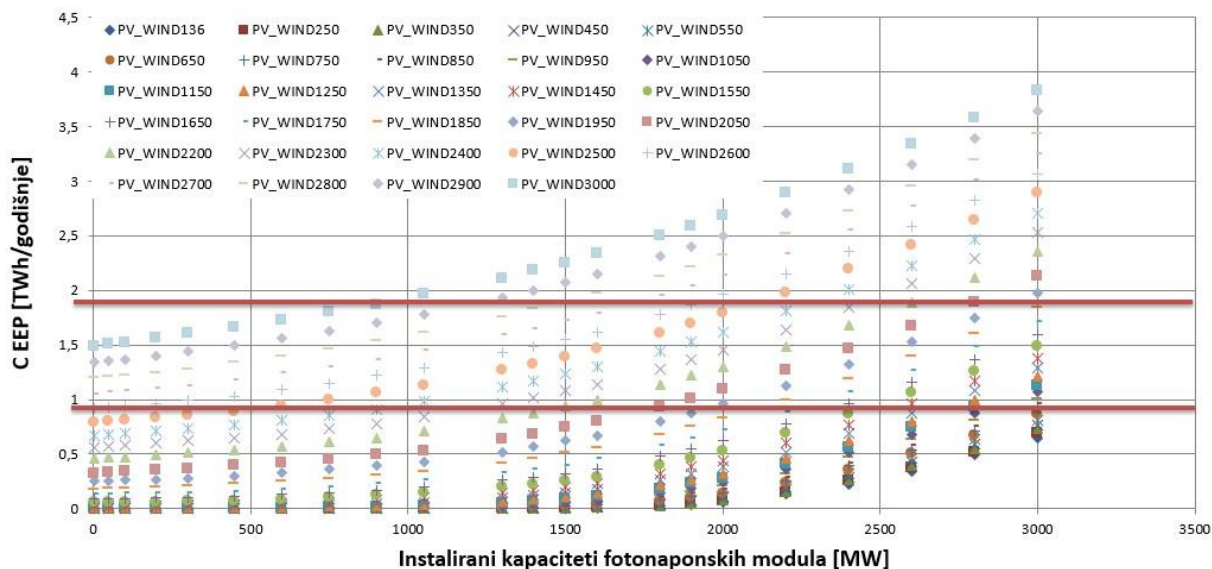


Slika 12. Pareto analiza kada su vjetroelektrane konstantne

Tablica 5. Optimalni scenariji za CEEP-CO<sub>2</sub> graf kada su kapaciteti vjetroelektrana konstantni

| Kapacitet VE [MW] | Kapacitet fotonapona [MW] | CEEP (TWh/god) | Uvoz (TWh/god) | RES (TWh/god) | CO <sub>2</sub> emisije (Mt) |
|-------------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 2300              | 1900                      | 1,37           | 1,99           | 12,98         | 16,49                        |
| 2050              | 1050                      | 0,53           | 2,8            | 11,8          | 16,58                        |
| 1850              | 1800                      | 0,68           | 2,46           | 11,77         | 16,51                        |
| 1750              | 1900                      | 0,58           | 2,56           | 11,53         | 16,52                        |
| 1650              | 1900                      | 0,55           | 2,61           | 11,43         | 16,53                        |
| 1750              | 1600                      | 0,46           | 2,69           | 11,24         | 16,54                        |
| 1650              | 1600                      | 0,36           | 2,81           | 11,01         | 16,55                        |

Uzevši u obzir da se Pareto analiza detaljno objasnila, idu i grafovi ne e na sebi imati Pareto krivulju kako bi se održala određena razina vidljivosti. U felji da se prikaffe detaljnija slika 9, slika 13 je korištena. Opet se vidi kako CEEP raste s instaliranim kapacitetima, stoga ne iznenađujućina je činjenica da je Pareto analiza izabrala služajeve kada je minimalno vjetroelektrana.



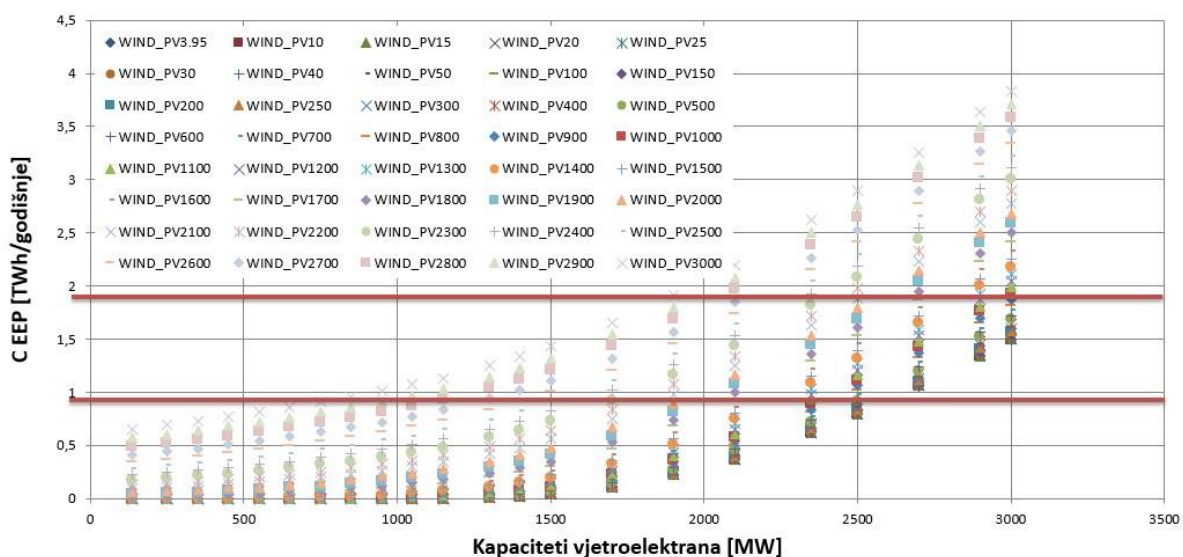
Slika 13. CEEP-fotonaponski moduli dijagram

Podaci dobiveni iz slike 13 sugeriraju kako se radi o optimalnim scenarijima, međutim, pošto slika 13 prikazuje ovisnost CEEP-a o instaliranim kapacitetima fotonaponskih modula, ti scenariji zadovoljavaju samo kriteriju najnižeg CEEP-a. Razlog tomu je što Pareto analiza tražiti te koje imaju najniži CEEP za određene kapacitete fotonaponskih modula, a najniži CEEP može biti ostvaren u scenarijima koji za konstantni kapacitet fotonaponskih modula imaju minimalne kapacitete vjetroelektrana. Iz toga se može zaključiti kako treba prikazivati samo scenarije s minimalnim instaliranim kapacitetima vjetroelektrana, dok se fotonaponski moduli mogu biti između 2000 i 3000 MW zbog dopuštene granice od 5 % CEEP-a.

Tablica 6. Optimalni scenariji za CEEP-fotonaponski moduli graf

| Kapacitet VE [MW] | Kapacitet fotonaponsa [MW] | CEEP (TWh/god) | Uvoz (TWh/god) | RES (TWh/god) | CO <sub>2</sub> emisije (Mt) |
|-------------------|----------------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 136               | 3000                       | 0,65           | 4,42           | 9,39          | 16,59                        |
| 136               | 2800                       | 0,49           | 4,53           | 9,1           | 16,68                        |
| 136               | 2600                       | 0,34           | 4,66           | 8,82          | 16,68                        |
| 136               | 2400                       | 0,22           | 4,79           | 8,53          | 16,69                        |
| 136               | 2200                       | 0,13           | 4,95           | 8,25          | 16,7                         |
| 136               | 2000                       | 0,06           | 5,12           | 7,97          | 16,73                        |

Poueni iz slike 13, slika 14 e pratiti isti princip. Uzev-i u obzir kako CEEP raste proporcionalno s rastom kapaciteta vjetroelektrana, a Pareto analiza traffi minimalni CEEP za konstantni kapacitet vjetroelektrana, za o ekivati je da e kapaciteti fotonaponskih modula biti minimalni. Me utim zbog reffima rada EnergyPLAN-a, koji se koristi za ve e kapacitete, krivulja CEEP-a izgleda identi no za slu aj kada su fotonaponski moduli 3,95 MW i kada su 40 MW. Zbog nezatnog utjecaja na CEEP, ali pove anja proizvodnje energije iz obnovljivih izvora energije, razmatrat e se scenariji kod kojih je kapacitet fotonaponskih modula 40 MW.



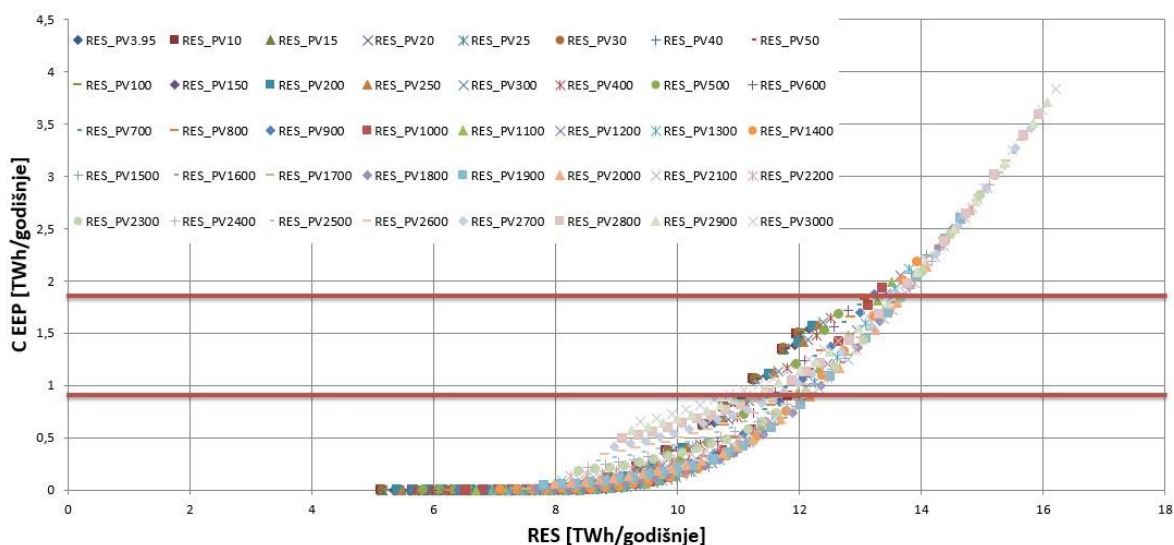
Slika 14. CEEP-vjetroelektrane dijagram

Kao i u tablici 6, tablica 7 e prikazivati scenarije kod kojih su konstantni kapaciteti, u ovom slu aju vjetroelektrane, izme u 2100 i 3000 MW. Detaljnije o optimalnim scenarijima se mođe vidjeti u tablici 7.

**Tablica 7. Optimalni scenariji za CEEP-kapaciteti vjetroelektrana graf**

| Kapacitet VE [MW] | Kapacitet fotonapona [MW] | CEEP (TWh/god) | Uvoz (TWh/god) | RES (TWh/god) | CO <sub>2</sub> emisije (Mt) |
|-------------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 3000              | 40                        | 1,5            | 2,93           | 12,01         | 16,61                        |
| 2900              | 40                        | 1,35           | 3,01           | 11,77         | 16,62                        |
| 2700              | 40                        | 1,06           | 3,18           | 11,29         | 16,63                        |
| 2500              | 40                        | 0,8            | 3,37           | 10,82         | 16,64                        |
| 2350              | 40                        | 0,13           | 3,53           | 10,46         | 16,65                        |
| 2100              | 40                        | 0,06           | 3,82           | 9,86          | 16,67                        |

U felji da se vidi kako koli ina proizvedene elektri ne energije iz obnovljivih izvora energije (RES) utje e na odabir optimalnog scenarija, RES je stavljen s CEEP-om u dijagram, kao -to je prikazano na slici 15.



**Slika 15. CEEP-RES dijagram za konstantan iznos fotonaponskih modula**

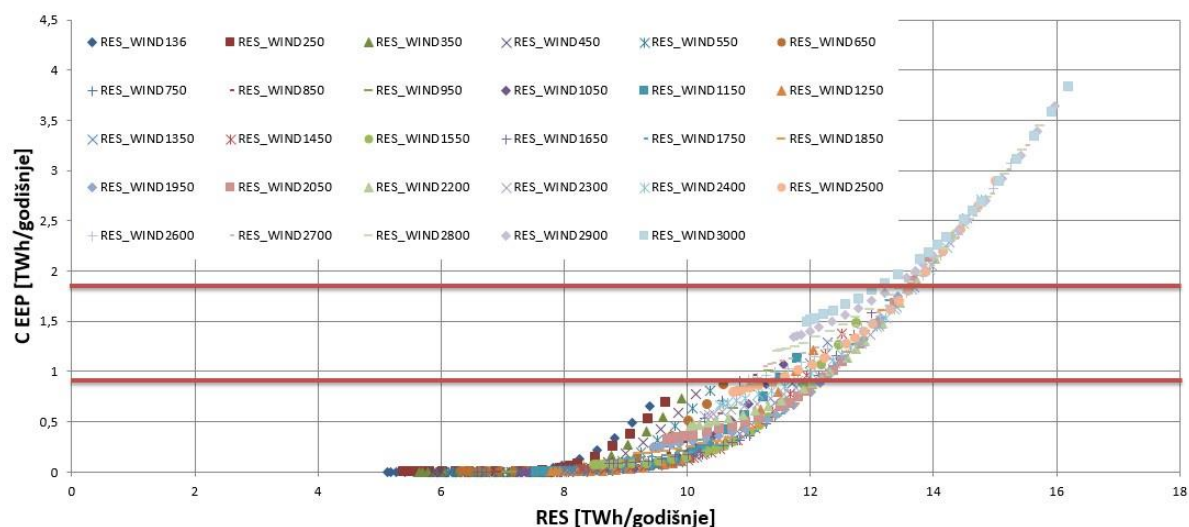


Uzevši u obzir da CEEP i RES rastu porastom kapaciteta obnovljivih izvora energije, grafovi CEEP-RES će imati kvalitetan optimalni scenarij. Pareto analiza je pokazala kako su scenariji kod kojih su konstantni kapaciteti fotonaponskih modula između 1800 MW i 2100 MW optimalni. Detaljnije o određenim optimalnim scenarijima se može vidjeti u tablici 8.

**Tablica 8. Optimalni scenariji za CEEP-RES graf kada su kapaciteti fotonapona konstantni**

| Kapacitet VE [MW] | Kapacitet fotonapona [MW] | CEEP (TWh/god) | Uvoz (TWh/god) | RES (TWh/god) | CO <sub>2</sub> emisije (Mt) |
|-------------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 2350              | 2100                      | 1,63           | 1,86           | 13,39         | 16,49                        |
| 1700              | 2100                      | 0,75           | 2,44           | 11,84         | 16,52                        |
| 1900              | 2000                      | 0,89           | 2,29           | 12,17         | 16,51                        |
| 1500              | 1900                      | 0,59           | 2,55           | 11,55         | 16,52                        |
| 1500              | 2100                      | 0,56           | 2,67           | 11,36         | 16,55                        |
| 2350              | 1900                      | 1,45           | 1,96           | 13,1          | 16,49                        |

Prateći princip iz slike 15, slika 16 je također pokazala kako CEEP i RES rastu porastom kapaciteta obnovljivih izvora energije. Nakon provedene Pareto analize, rješenja su bila širokog spektra, to nije između 1450 MW i 2400 MW konstantnih kapaciteta vjetroelektrana, što je relativno slično prethodnoj Pareto analizi.



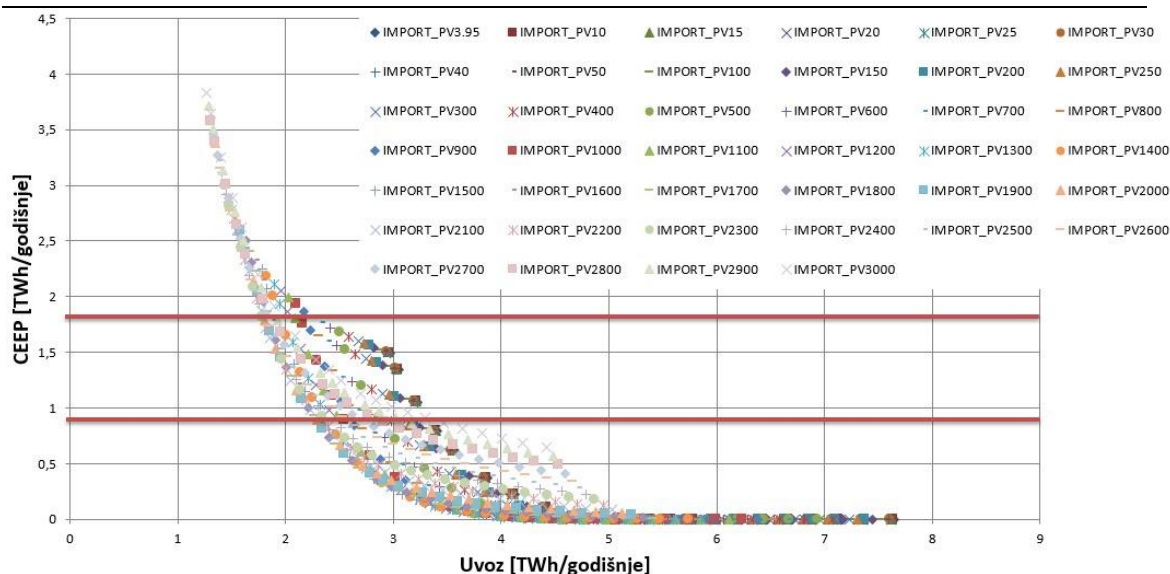
**Slika 16. CEEP-RES dijagram za konstantan iznos vjetroelektrana**

Određeni optimalni scenariji koji su dobiveni Pareto analizom iz slike 16 se mogu vidjeti u tablici 9.

**Tablica 9. Optimalni scenariji za CEEP-RES graf kada su kapaciteti vjetroelektrana konstantni**

| Kapacitet VE [MW] | Kapacitet fotonaponski [MW] | CEEP (TWh/god) | Uvoz (TWh/god) | RES (TWh/god) | CO <sub>2</sub> emisije (Mt) |
|-------------------|-----------------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 1450              | 1400                        | 0,17           | 3,23           | 10,25         | 16,63                        |
| 1550              | 1400                        | 0,22           | 3,09           | 10,48         | 16,6                         |
| 1650              | 1400                        | 0,29           | 2,96           | 10,72         | 16,59                        |
| 1650              | 1600                        | 0,36           | 2,81           | 11,01         | 16,55                        |
| 1750              | 1600                        | 0,46           | 2,69           | 11,24         | 16,54                        |
| 2050              | 1600                        | 0,8            | 2,38           | 11,96         | 16,52                        |
| 2300              | 1800                        | 1,28           | 2,04           | 12,84         | 16,5                         |
| 2400              | 1900                        | 1,53           | 1,92           | 13,22         | 16,49                        |

Zbog činjenice da je uvoz električne energije jedan od većih razloga pisanja ovog rada, također se i uvoz uključio u Pareto analizu kako bi se pronašao optimalni scenarij. Rezultati za konstantne kapacitete fotonaponskih modula se vidi na slici 17, gdje optimalni scenariji predstavljaju slučajeve izmeđ u 1400 MW i 2200 MW fotonaponskih modula.



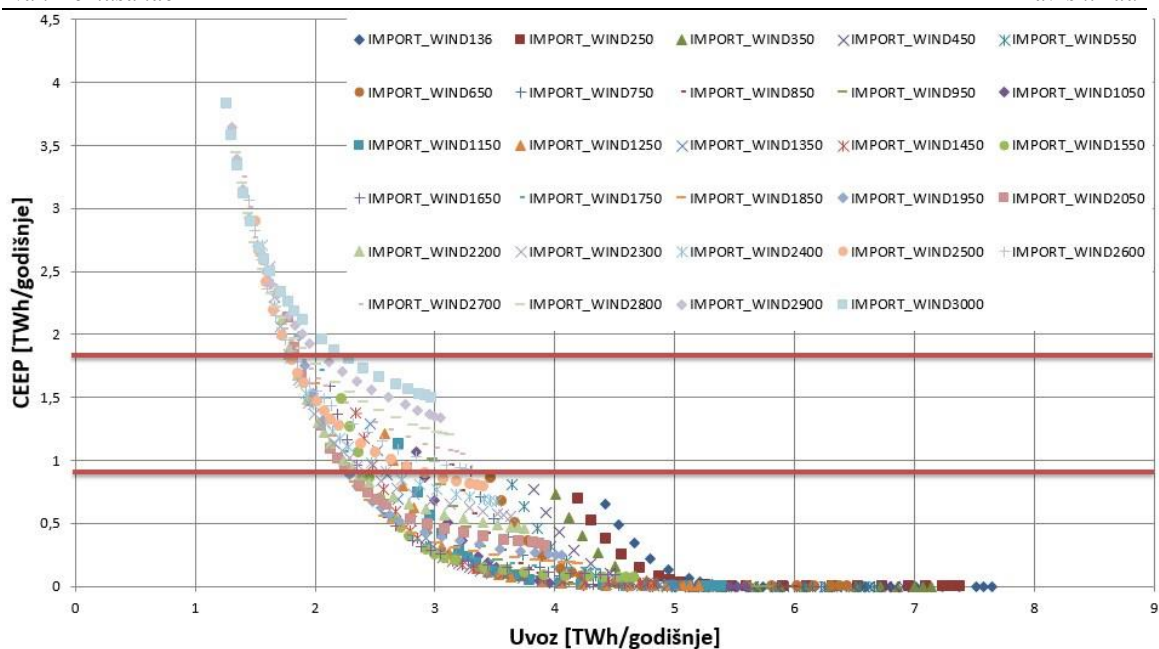
Slika 17. CEEP-Uvoz dijagram za konstantan iznos fotonaponskih modula

Ve se ustanovilo kako ve om penetracijom obnovljivih izvora energije raste CEEP, ali isto tako treba napomenuti da se uvoz smanjuje pove anom penetracijom. Optimalni scenariji koji e se vjerojatno nalaziti u donjem lijevom kutu slike 17 se mogu vidjeti u tablici 10.

Tablica 10. Optimalni scenariji za CEEP-uvoz graf kada su kapaciteti fotonapona konstantni

| Kapacitet VE [MW] | Kapacitet fotonapona [MW] | CEEP (TWh/god) | Uvoz (TWh/god) | RES (TWh/god) | CO <sub>2</sub> emisije (Mt) |
|-------------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 1400              | 1400                      | 0,15           | 3,3            | 10,13         | 16,64                        |
| 1500              | 1500                      | 0,22           | 3,08           | 10,51         | 16,6                         |
| 1700              | 1800                      | 0,53           | 2,62           | 11,41         | 16,53                        |
| 1700              | 2000                      | 0,67           | 2,5            | 11,69         | 16,52                        |
| 2350              | 2200                      | 1,72           | 1,82           | 13,53         | 16,5                         |

Zatim prate i isti princip, CEEP raste, dok se uvoz smanjuje za ve u penetraciju obnovljivih izvora energije. Nakon Pareto analize u slici 18, gdje su kapaciteti vjetroelektrana konstantni, a kapaciteti fotonaponskih modula se mijenja, dolazi se do grupe scenarija prema kojima kapaciteti vjetroelektrana trebaju biti izme u 1550 i 2400 MW.



Slika 18. CEEP-Uvoz dijagram za konstantan iznos vjetroelektrana

Za konstantne kapacitete vjetroelektrana, Pareto analiza slike 18 je predložila scenarije koji imaju kapacitete fotonaponskih modula između 1400 i 1800 MW da su optimalni, –to je jako slično optimalnim scenarijima iz prethodnog slučaja. Detaljnije o optimalnim scenarijima za ovaj slučaj se mogu vidjeti u tablici 11.

Tablica 11. Optimalni scenariji za CEEP-uvoz graf kada su kapaciteti vjetroelektrana konstantni

| Kapacitet VE [MW] | Kapacitet fotonaponski [MW] | CEEP (TWh/god) | Uvoz (TWh/god) | RES (TWh/god) | CO <sub>2</sub> emisije (Mt) |
|-------------------|-----------------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 1550              | 1400                        | 0,22           | 3,09           | 10,48         | 16,6                         |
| 1650              | 1400                        | 0,29           | 2,96           | 10,72         | 16,59                        |
| 2050              | 1600                        | 0,8            | 2,38           | 11,96         | 16,52                        |
| 2300              | 1800                        | 1,28           | 2,04           | 12,84         | 16,5                         |
| 2400              | 1800                        | 1,44           | 1,98           | 13,08         | 16,49                        |

#### 4. OCJENJIVANJE SCENARIJA

Pareto analiza je prikazala 39 optimalnih scenarija, među tim scenarijima se značajno razlikuju u svim četirjema kategorijama, CEEP-u, uvozu, RES-u i CO<sub>2</sub> emisijama. Različite Pareto analize pokazale su različite optimalne scenarije, ovisno o slučaju. Stoga se neki scenariji odlikuju jako niskim uvozom električne energije, ali s značajno visokim CEEP-om, dok neki scenariji imaju nisku CEEP i nisku RES. Sada je potreban način kako odabrati optimalni scenarij od već ranije navedenih, zbog toga se koristila analiza višestrukih kriterija. Analiza višestrukih kriterija (engl. *Multiple criteria decision analysis*) je metoda koja se koristi kako bi se ocijenili određeni scenariji na temelju njihovih vrijednosti i težina [41]. Iako danas postoje stotine vrsta analiza višestrukih kriterija, ovaj rad će koristiti teoriju vrijednosti višestrukih atributa (engl. *Multi-attribute value theory*). U takvom pristupu, nakon što se određeni broj kriterija odabrao, scenariji će dobivati ocjene na određenoj skali, npr. 1-10. Svaki kriterij će dobiti svoju težinu, parcijalnu vrijednost koja će predstavljati određeni udio u finalnom bodovanju. Na poslijetku, ukupni rezultat se izražava te se pomoću toga dobije jedan scenarij. Sve što se opisalo u ovom paragrafu se može vidjeti u tablici 12. Uzevši u obzir činjenicu da je Pareto analiza sama po sebi identificirala optimalne scenarije, rezultati se neće drastično razlikovati u analizi višestrukih kriterija.

**Tablica 12. Vrijednosti kriterija te propisane težine**

| Kriteriji                    | Vrijednosti kriterija |         | Dodijeljena težina<br>% |
|------------------------------|-----------------------|---------|-------------------------|
|                              | Najbolji              | Najgori |                         |
| CEEP (TWh/godišnje)          | 0                     | 1,82    | 30                      |
| RES (TWh/godišnje)           | 17                    | 5       | 25                      |
| Uvoz (TWh/godišnje)          | 0                     | 8       | 25                      |
| CO <sub>2</sub> emisija (Mt) | 16,47                 | 17      | 20                      |

Matematički zapis koji se odnosi na tablicu 1 se vidi u jednadžbi 1.

##### Jednadžba 1. Matematički zapis teorije višestrukih atributa

$$V(a) = \sum_{j=1}^n w_j [v_j(a)] \quad (1)$$

Gdje je:

$$v_j(\text{najbolji}) = 100, v_j(\text{najgori}) = 0, V(\text{ukupno najbolji}) = 100, V(\text{ukupno najgori}) = 0,$$

$$v_j = (\text{najbolji} - \text{najgori}) / (\text{najbolji} - \text{najgori}), \text{ je normalizacija,}$$

$w_j$ , is konstanta skaliranja,

$v_j(a)$ , parcijalni rezultat opcije kada je kriterij  $j$ ,

$V(a)$ , ukupni rezultat opcije  $a$ .

Svih 39 scenarija je podvrgnuto teoriji vi-estrukih atributa, a tablica 13 pokazuje detaljniji na in prora una. Ti scenariji su najgori scenariji koje je Pareto analiza predstavila kao optimalne.

**Tablica 13. Ukupne ocjene najgorih scenarija**

|        | 1,9 GW PV  | 2,4 GW Vjetra |         | 1,8 GW PV  | 2,3 GW Vjetra |         |
|--------|------------|---------------|---------|------------|---------------|---------|
|        | Vrijednost | Normalizacija | Teffina | Vrijednost | Normalizacija | Teffina |
| CEEP   | 1,53       | 15,93         | 4,78    | 1,28       | 29,67         | 8,9     |
| RES    | 13,22      | 68,5          | 17,13   | 12,84      | 65,33         | 16,33   |
| Uvoz   | 1,92       | 76            | 19      | 2,04       | 74,5          | 18,63   |
| CO2    | 16,49      | 96,23         | 19,25   | 16,5       | 94,34         | 18,87   |
| Ukupno |            |               | 60,15   |            |               | 62,73   |

Kao -to se mođe vidjeti u tablici 13, odabrani scenariji predstavljaju potencijalno rje-enje, me utim zbog njihovog relativno visokog CEEP-a su ispali najgori od 39 scenarija. S druge strane, tablica 14, tablica 15 i tablica 16 prikazuju pet scenarija koji su odabrani kao optimalni, a zatim ih je teorija vi-estrukih atributa tako er potvrdila kao mogu e scenarije za elektroenergetski sustav Republike Hrvatske.

**Tablica 14. Ukupne ocjene vrlo dobrih scenarija**

|                 | 1,9 GW PV  | 1,5 GW Vjetra |         | 1,6 GW PV  | 1,75 GW Vjetra |         |
|-----------------|------------|---------------|---------|------------|----------------|---------|
|                 | Vrijednost | Normalizacija | Teffina | Vrijednost | Normalizacija  | Teffina |
| CEEP            | 0,41       | 77,47         | 23,24   | 0,46       | 74,73          | 22,42   |
| RES             | 11,08      | 50,67         | 12,67   | 11,24      | 52             | 13      |
| Uvoz            | 2,79       | 65,13         | 16,28   | 2,69       | 66,38          | 16,59   |
| CO <sub>2</sub> | 16,55      | 84,91         | 16,98   | 16,54      | 86,79          | 17,36   |
| Ukupno          |            |               | 69,17   |            |                | 69,37   |

**Tablica 15. Ukupne ocjene dobrih scenarija**

|                 | 1,8 GW PV  | 1,7 GW Vjetra |         | 1,7 GW PV  | 2 GW Vjetra   |         |
|-----------------|------------|---------------|---------|------------|---------------|---------|
|                 | Vrijednost | Normalizacija | Teflina | Vrijednost | Normalizacija | Teflina |
| CEEP            | 0,53       | 70,88         | 21,26   | 0,67       | 63,19         | 18,96   |
| RES             | 11,41      | 53,42         | 13,54   | 11,69      | 55,75         | 13,94   |
| Uvoz            | 2,62       | 67,25         | 16,81   | 2,5        | 68,75         | 17,19   |
| CO <sub>2</sub> | 16,53      | 88,68         | 17,74   | 16,52      | 90,57         | 18,11   |
| Ukupno          |            |               | 69,17   |            |               | 68,19   |

**Tablica 16. Ukupna ocjene najboljeg scenarija**

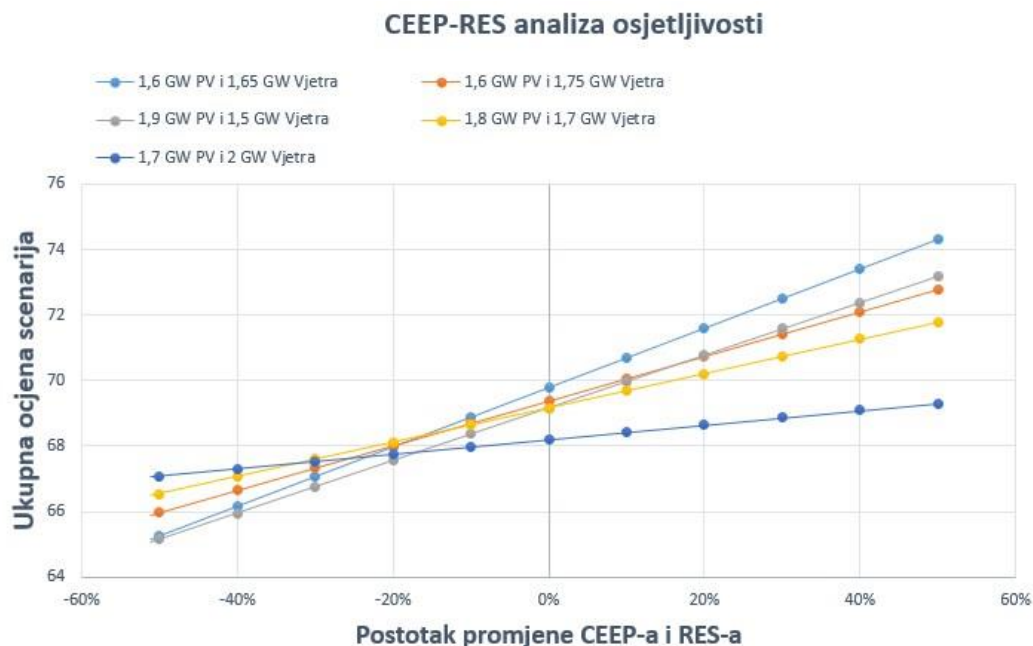
|                 | 1,6 GW PV  | 1,65 GW Vjetra |         |
|-----------------|------------|----------------|---------|
|                 | Vrijednost | Normalizacija  | Teflina |
| CEEP            | 0,36       | 80,22          | 24,1    |
| RES             | 11,01      | 50,08          | 12,52   |
| Uvoz            | 2,81       | 64,88          | 16,22   |
| CO <sub>2</sub> | 16,55      | 84,91          | 16,98   |
| Ukupno          |            |                | 69,79   |

Iako scenarij s tablice 16 izgleda kao ukupno najbolje rješenje, ne znači da je nužno bolji od sluajeva iz tablice 14 i tablice 15, gdje postoji veći kapacitet obnovljivih izvora energije. Scenarij iz tablice 16 može biti optimalni za elektroenergetski sustav jer ima niži CEEP, dok ostali scenariji imaju veći negativni utjecaj na elektroenergetski sustav, ali zato stvara više poslova u Hrvatskoj.

## 5. ANALIZA OSJETLJIVOSTI

U ovom poglavlju prikazan je utjecaj dodijeljenih teflina na pet najboljih scenarija. Analiza osjetljivosti je izvedena tako –to su se dva kriterija fiksirala na konstantne vrijednosti, dok su se druga dva kriterija mijenjala. Jedan od dva kriterija se mijenjao pojedina nim pove avanjem za 10 %, 20 %, 30 %, 40 % i 50 % dok bi se drugi kriterij smanjivao proporcionalno. Nakon toga su se zamijenile uloge, te bi se prvi kriterij smanjivao za 10 %, 20 %, 30 %, 40 % i 50 % dok bi se drugi kriterij pove avao proporcionalno.

Slika 19 prikazuje analizu osjetljivosti pri kojoj su tefline uvoza i CO<sub>2</sub> emisija konstantni kriteriji, dok se tefline CEEP-a i RES-a mijenjaju. Prilikom smanjenja utjecaja tefline CEEP-a, pove at e se utjecaj tefline za RES. U tom slu aju opada ukupna ocjena za sve scenarije, dok je to izrafleno najvi-e kod scenarija koji ima najmanje instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora energije, a time i najmanji RES.

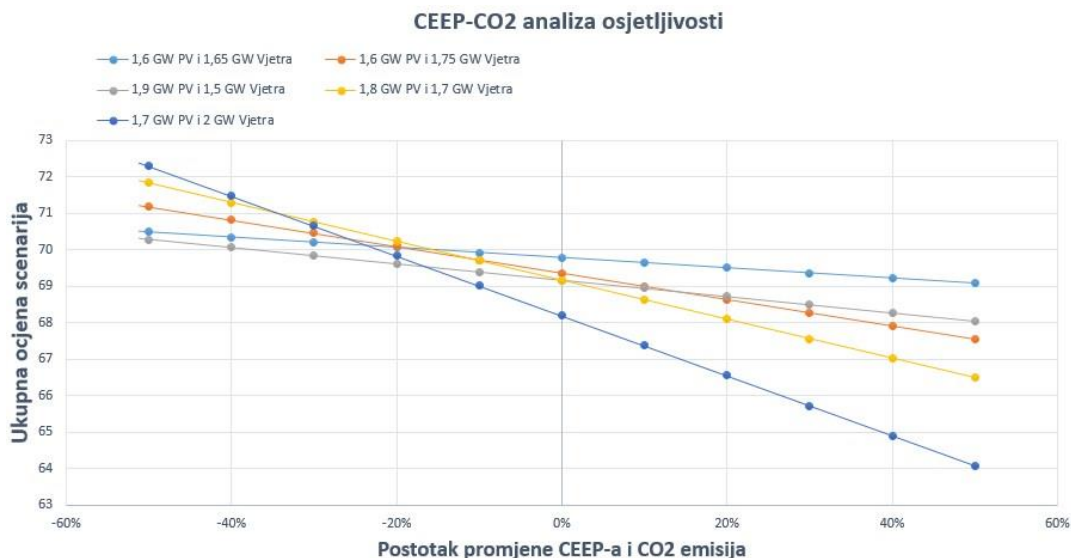


Slika 19. CEEP-RES dijagram za promijenjene vrijednosti težina

Tako er se na slici 19 mofle vidjeti kako pri pove anju utjecaja tefline CEEP-a se smanjuje utjecaj RES-a, a to najvi-e pomafle najboljem scenariju jer ima najmanji RES od svih optimalnih scenarija, ali i najnifli CEEP.



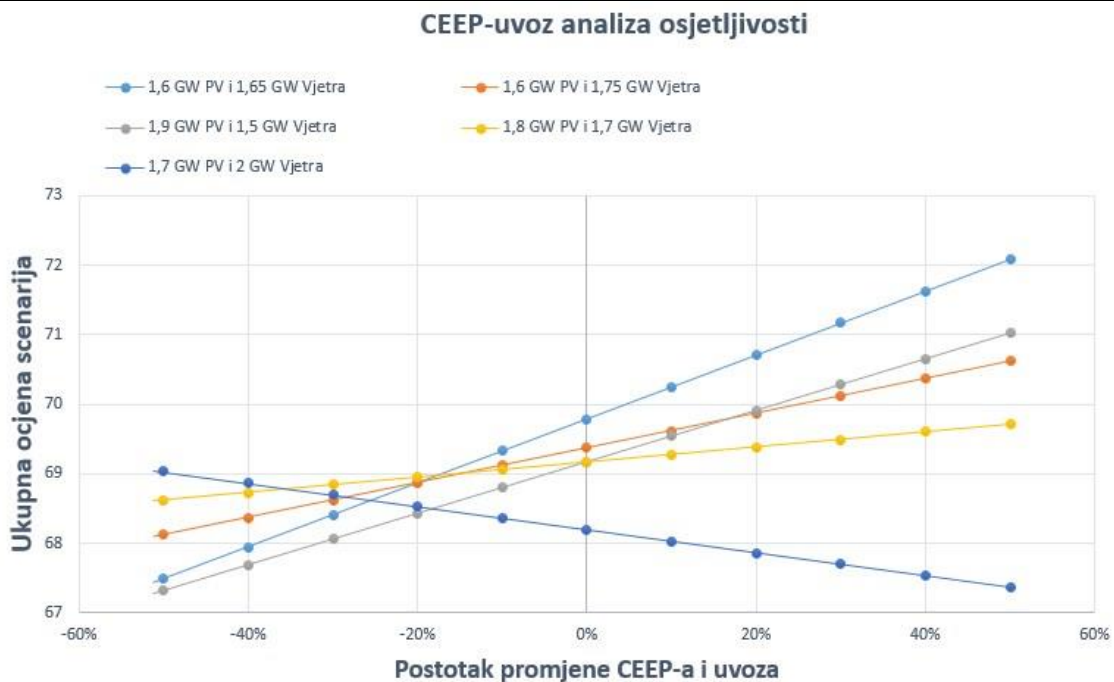
Pra eni istim principom iz prethodnog primjera, slika 20 se razlikuje tako –to su ovaj put tefline RES-a i uvoza konstantni kriteriji, dok se tefline CEEP-a i CO<sub>2</sub> emisija mijenjaju. Prilikom smanjenja utjecaja tefline CEEP-a, pove at e se utjecaj tefline za CO<sub>2</sub> emisija. U tom slu aju raste ukupna ocjena za sve scenarije, dok je to izrafleno najvi-e kod scenarija koji ima najvi-e instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora energije jer time doprinosi ve em smanjenju CO<sub>2</sub> emisija.



**Slika 20. CEEP-CO<sub>2</sub> dijagram za promijenjene vrijednosti težina**

Tako er se na slici 20 mofle vidjeti kako pri pove anju utjecaja tefline CEEP-a najvi-e ima koristi scenarij s najmanje obnovljivih izvora energije zbog svog izrazito niskog CEEP-a.

Kao posljednji primjer analize osjetljivosti se odabrao slu aj kada su tefline CO<sub>2</sub> emisija i RES-a konstantni, a tefline CEEP-a i uvoza se mijenjaju. Slika 21 pokazuje da e smanjivanjem tefline CEEP-a opet najve u korist imati scenarij s najvi-e kapaciteta obnovljivih izvora energije. Kao i u prethodnim analizama osjetljivosti, rastom tefline CEEP-a e najvi-e pomo i najboljem scenariju jer on ima najmanje kapaciteta obnovljivih izvora energije, a time i najmanje CEEP-a.



Slika 21. CEEP-uvoz dijagram za promijenjene vrijednosti težina

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu su predstavljene neke od smjernica za hrvatsku energetska strategiju. Uzevši u obzir da Hrvatska uvozi značajan dio električne energije, to nije 36 % u 2012. godini, otkriva se kako i hrvatski elektroenergetski sustav može primiti veliku količinu vjetroelektrana i fotonaponskih modula. Dodatni kapaciteti od 1,6 GW vjetroelektrana i 1,6 GW fotonaponskih modula na prvi pogled imaju relativno nisku količinu smanjenja CO<sub>2</sub>, svega 300 t godišnje, ona je niska samo na razini države, gledajući globalno, značajnije je smanjenje u emisiji CO<sub>2</sub> zbog implementacije ovakvog scenarija. Međutim veliki utjecaj praćenja ovakvog scenarija se vidi u kategoriji proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, koji je dosegnuo čak 70%.

Iako se do sada govorilo kako treba biti značajno više vjetroelektrana od fotonaponskih sustava, to vrijedi za zemlje centralne i sjeverne Europe, dok za Hrvatsku zbog geografske pozicije i klime, južni krajevi nemaju problema pri prikupljanju sunčeve energije. Stoga ne treba doći kao iznenađenje da fotonaponski moduli konkuriraju vjetroelektranama. Međutim, ne treba se fokusirati samo na fotonaponske module zbog ovog zaključka. Ovaj rad je dokazao kako se kombinacijom vjetroelektrana i fotonaponskih modula može postići veći udio obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sustavu nego da se fokusiralo u samo jednu tehnologiju. Također treba napomenuti kako je kombinacija vjetroelektrana i fotonaponskih modula doprinijela niže emisije CO<sub>2</sub>, nego da se opet fokusiralo samo na vjetroelektrane ili samo na fotonaponske module. Razlog tomu je što uglavnom vjetro ima više emisije tijekom noći pa se time može nadopunjavati s fotonaponskim modulima koji rade samo tijekom dana.

Za kraj treba napomenuti kako je ovaj rad identificirao scenarij od 1,65 GW vjetroelektrana i 1,6 GW fotonaponskih modula kao optimalni za trenutnu infrastrukturu, koja nema previše mogućnosti za regulaciju i pohranu viška proizvedene električne energije. Iako je scenarij s 2,4 GW vjetroelektrana i 1,9 GW fotonaponskih modula ispao kao najgori scenarij koji je podvrgnut analizi višestrukih kriterija, on može biti jedan od smjernica za daljnju budućnost, koji se gledati nakon što se postigne optimalni scenarij, ali samo ako se investira u dodatne sustave za regulaciju i pohranu električne energije.

**LITERATURA**

- [1] <http://www.nationsonline.org/oneworld/croatia.htm>
- [2] Overview of intermodal liner passenger connections within Croatian seaports  
<http://bib.irb.hr/prikazi-rad?lang=en&rad=634811>
- [3] Popis stanovništva kućanstava i stanova 2011  
[http://www.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2012/SI-1468.pdf](http://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2012/SI-1468.pdf)
- [4] <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/hr.html>
- [5] <http://www.adriagate.com/Hrvatska-hr/Pomoc/Klima-Hrvatska>
- [6] <http://www.hr/hrvatska/geografija/jadran/vjetrovi>
- [7] European Commission. EU Energy in figures ó statistical pocketbook 2014. Luxembourg: EU; 2014, ISBN 978-92-79-29317-7
- [8] European Commission, policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030 /COM/2014/015 final/
- [9] Zervos A, Lins C, Muth J, Smith E. RE-thinking 2050: a 100% renewable energy vision for the European Union, EREC ó European Renewable Energy Council; 2010. Asa
- [10] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Insolacija#/media/File:SolarGIS-Solar-map-Croatia-en.png>
- [11] Szklo AS, Schaeffer R, Schuller ME, Chandler W. Brazilian energy policies side effects on CO2 emissions reduction. Energy Policy 2005;33(3):349664.
- [12] Chua KJ, Yang WM, Er SS, Ho CA. Sustainable energy systems for a remote island community. Appl Energy 2014;113:1752663.
- [13] Østergaard PA, Lund H. A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. Appl Energy 2011;88(2):479687.
- [14] Wenjia C, Can W, Ke W, Ying Z, Jining C. Scenario analysis on CO2 emissions reduction potential in China's electricity sector. Energy Policy 2007;35(12):6445656.
- [15] Hickman R, Banister D. Looking over the horizon: Transport and reduced CO2 emissions in the UK by 2030. Transp Policy 2007;14(5):377687.
- [16] Shimoda Y, Yamaguchi Y, Okamura T, Taniguchi A, Yamaguchi Y. Prediction of greenhouse gas reduction potential in Japanese residential sector by residential energy end-use model. Appl Energy 2010;87(6):1944652.

- [17] Kraja i G, Dui N, Zmijarevi Z, Mathiesen BV, Ani -Vu ini A, Carvalho MG. Planning for a 100% independent energy system based on smart energy storage for integration of renewables and CO2 emissions reduction. *Appl Therm Eng* 2011;31(13):2073683.
- [18] Irsag B, Puk-ec T, Duic´ N. Long term energy demand projection and potential for energy savings of Croatian tourismó catering trade sector. *Energy* 2012;48(1):3986405.
- [19] The Danish Government, Energy strategy 2050 ó from coal, oil and gas to green energy; 2011.
- [20] German Federal Ministry of Economics and Technology, Germany's new energy policy ó Heading towards 2050 with secure, affordable and environmentally sound energy; 2012.
- [21] Strategy for Renewable Energy: 201262020 [Internet]. Irish Department of Communications, Energy and Natural Resources, Ireland; 2012. <[http://www.dcenr.gov.ie/NR/rdonlyres/9472D68A-40F4-41B8-B8FD-F5F788D4207A/0/RenewableEnergyStrategy2012\\_2020.pdf](http://www.dcenr.gov.ie/NR/rdonlyres/9472D68A-40F4-41B8-B8FD-F5F788D4207A/0/RenewableEnergyStrategy2012_2020.pdf)> [accessed 15.02.15].
- [22] <http://mars.dhz.hr/web/index.html>
- [23] The European Wind Energy Association, Wind in power: 2011 European statistics, February 2013
- [24] The European Wind Energy Association, Wind in power: 2014 European statistics, February 2015
- [25] Photovoltaic barometer 2014 EurObservER, 2015
- [26] International Energy Agency, Snapshot of Global PV Markets 2014, ISBN 978-3-906042-32-9
- [27] Ministry of Economy Labour and Entrepreneurship. Energy in Croatia ó Annual Energy Report ó 2009, Zagreb, Croatia; 2010
- [28] Hrvatski sabor, Strategija energetske razvoja Republike Hrvatske, Listopad 2009.
- [29] Lund Henrik, Dui Neven, Kraja i Goran, Carvalho Maria da Graça. Two energy system analysis models: a comparison of methodologies and results. *Energy* 2007;32(6):948654.
- [30] Energy Lund H, Mathiesen BV. Energy system analysis of 100% renewable energy systems-the case of denmark in years 2030 and 2050. *Energy* 2009;34(5):524631.
- [31] Connolly D, Lund H, Mathiesen BV, Leahy M. The first step towards a 100% renewable energy-system for ireland. *Appl Energy* 2011;88(2):50267.
- [32] osi Boris, Kraja i Goran, Dui Neven. A 100% renewable energy system in the year 2050: the case of macedonia. *Energy* 2012;48(1):8067.

- 
- [33] Hong Lixuan, Lund Henrik, Möller Bernd. The importance of flexible power plant operation for Jiangsu's wind integration. *Energy* 2012;41(1):499-507.
- [34] Le Ngoc Anh, Bhattacharyya Subhes C. Integration of wind power into the British system in 2020. *Energy* 2011;36(10):5975-5983.
- [35] <http://www.hep.hr/proizvodnja/>
- [36] Lund H. EnergyPLAN - advanced energy system analysis computer model, users manual documentation version 9.0., Aalborg, Denmark: Aalborg University; 2011.
- [37] <https://www.entsoe.eu/Pages/default.aspx>
- [38] METEONORM, Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education: <http://www.meteonorm.com>
- [39] Pareto efficiency, [http://en.wikipedia.org/wiki/Pareto\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_efficiency)
- [40] Ministry of Economy Labour and Entrepreneurship. Energy in Croatia - Annual Energy Report - 2012, Zagreb, Croatia; 2013
- [41] Løken E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renew Sust Energy Rev* 2007;11(7):1584-695.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc