

Model hrvatskog elektroenergetskog sustava s uključenim modelom susjednih sustava u programskom alatu PLEXOS

Autor: prof. dr. sc. Željko Tomšić, dipl. ing., Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, Unska 3, 10000 Zagreb, Zeljko.Tomsic@fer.hr, Telefon: 016129983, Faks: 016129890

Ostali autori:

dr.sc. Ivan Rajšl, ivan.rajsl@fer.hr; Josip Srebrović, josip.srebrovic@fer.hr, mag.ing.el.teh.inf.; Lovro Benedik, lovro.benedikt@fer.hr, mag.ing.el.teh.inf.; Ivan Palac, mag.ing.el.teh.inf., ivan.palac@hep.hr; Matea Filipović, mag.ing.el.teh.inf., matea.filipovic@fer.hr

Sažetak- Rad prikazuje rezultate zajedničkog istraživanja i analize stručnjaka iz Hrvatske elektroprivrede d.d. i Fakulteta elektrotehnike i računarstva. Ovim radom analizirani su i modelirani elektroenergetski sustavi srednje, istočne i jugoistočne Europe u programskom paketu PLEXOS. Analiza uključuje elektroenergetske sustave Republike Hrvatske, Slovenije, Mađarske, Rumunjske, Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Makedonije, Albanije, Bugarske, Kosova, te tržišta Italije, Austrije, Ukrajine i Grčke. Za Hrvatski elektroenergetski sustav bili su dostupni detaljniji podaci nego oni korišteni za sustave ostalih zemalja u regiji stoga je i hrvatski sustav detaljnije modeliran. Ostali podaci preuzeti su sa internetskih stranica ENTSO-e i raznih javno dostupnih dokumenata, kao na primjer strategije razvika elektroenergetskih sustava navedenih zemalja. Od komponenata elektroenergetskog sustava, modelirane su one najbitnije, a to su generatori (u slučaju PLEXOS-a ekvivalenti elektrana), prijenosni vodovi, čvorišta, koncentrirani centri potrošnje električne energije, cijene energenata itd. Analiziran je i scenarij ulaska zemalja regije u sustav trgovanja emisijama ETS na način da je u ukupnu cijenu ugljena ili plina uključena i cijena emisija stakleničkih plinova koja povećava ukupnu cijenu proizvodnje energije iz termoelektrana što utječe na njihov rad i na rad cijelog sustava. Između ostalih mogućnosti programski alat PLEXOS omogućava i dugoročnu analizu razvoja elektroenergetskog sustava. Dugoročni plan rada sustava PLEXOS-a služi prije svega za analiziranje isplativosti izgradnje novih elektrana. U svakom od modeliranih scenarija promatrana je izgradnja novih proizvodnih kapaciteta.

I. UVOD

U današnje vrijeme nesigurnosti, teško se odlučiti za izgradnju novih elektrana. Za izgradnju nove elektrane potrebno je predvidjeti kretanje cijena električne energije, cijenu energenata, povećanje potrošnje, te troškove izgradnje elektrane. Osim toga potrebno je parametre proširiti na regiju zbog njenog utjecaja na tržište na kojem se planira izgraditi nova elektrana. Devedesete godine prošlog stoljeća donijele su značajne promjene u radu i organizaciji EES-a širom Europe u smislu razdvajanja djelatnosti i tvrtki elektroenergetskog sektora na regulirane djelatnosti prirodnog monopola (prijenos, distribucija) i tržišne djelatnosti (proizvodnja, trgovina,

opskrba). Otvaranjem regionalnog tržišta električne energije, za očekivati je da će se povećati razmjena među elektroenergetskim sustavima u okruženju što uzrokuje i potrebu za razvojem elektroenergetskih sustava regije. Ukoliko se teži analizirati hrvatski elektroenergetski sustav, potrebno je dakle uzeti u obzir i susjedne elektroenergetske sustave srednje, istočne i jugoistočne Europe. Unutar regije se analizira utjecaj jednog sustava na drugi sustav, odnosno analiziraju se tokovi električne energije između sustava. Tokovi električne energije ujedno čine uvoz i izvoz pojedinog sustava prema drugim. Spajanjem dva sustava omogućilo bi se trgovanje električnom energijom između sustava. Tržište omogućava kupnju električne energija jeftinije od troškova proizvodnje pojedinih elektrana u samom sustavu, što u konačnici dovodi do optimizacije proizvodnje. Kupnja ili prodaja električne energije na tržištima drugih država ograničena je kapacitetima prijenosnog sustava između država, što znači da se ne može kupiti ili prodati više električne energije nego li se može prenijeti prijenosnim sustavom. Kod pokrivanja potrošnje sustava primarno u vozni red ulaze protočne elektrane, nuklearne elektrane, obnovljivi izvori, a ostatak se pokušava pokriti uvozom iz susjednih elektroenergetskih sustava ili radom termoelektrana na ugljen ili plin ovisno o potrebnoj količini električne energije i trošku uvoza ili rada elektrane. Ukoliko se manjak proizvodnje ne može pokriti uvozom, tada se pokreću skuplje termoelektrane na ugljen ili plin koje svojim troškom povećavaju cijenu električne energije u elektroenergetskom sustavu. Ako je cijena električne energije na susjednom tržištu skuplja od troškova proizvodnje električne energije, elektroenergetski sustav će povećati proizvodnju kako bi prodao električnu energiju po višoj cijeni i tako zaradio. Ukoliko elektroenergetski sustavi imaju veće kapacitete interkonekcijskih prijenosnih vodova, te postoje tokovi električne energije kroz njih, formira se jedinstvena cijena električne energije u regiji. Ako su ograničeni kapaciteti prijenosnih vodova između sustava, dolazi do formiranja čvorišnih cijena unutra sustava, te se potiče povećanje kapaciteta prijenosnog sustava. Ne ulazeći u političke i organizacijske aspekte tržišta, izrađeni su modeli elektroenergetskih sustava sljedećih zemalja: Hrvatske, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Kosova, Srbije, Bugarske, Makedonije, Albanije, Mađarske, Slovenije i Rumunjske. Dodatno je modelirana Grčka, Italija,

Austrija i Ukrajina, ali samo kao dio tržišta električne energije. Radi jednostavnosti proračuna su napravljena dva modela za analizu susjednih elektroenergetskih sustava i njihovog utjecaja na elektroenergetski sustav Hrvatske. Jedan uključuje zemlje istočne i srednje Europe (Slovenija, Hrvatska, Mađarska, Rumunjska, te Italija, Austrija i Ukrajina kao dio tržišta), a drugi jugoistočnu regiju (Crna Gora, Bosna i Hercegovina, Kosovo, Albanija, Srbija, Bugarska, Makedonija, Hrvatska, te Grčka kao dio tržišta). Na internetskim stranicama ENTSO-e, udruženja europskih operatora prijenosnih sustava električne energije, javno su dostupni energetske profili ovih zemalja i preuzeti su neophodni podaci za izradu modela elektroenergetskih sustava (potrebni podaci mogu se pronaći preko navedenih referenci u literaturi). Najdetaljnije je izrađen model hrvatskog elektroenergetskog sustava jer su za njega bili dostupni podaci iz HEP-a i HOPS-a, (hrvatskog operatora prijenosne mreže). Ostale zemlje modelirane su manje detaljno s manjim brojem komponenata jer je bilo izrazito teško doći do određenih podataka, a i veći broj podataka znači kompliciraniji i složeniji model kojem je potrebno dulje vremensko razdoblje za izvođenje. Modeli su rađeni u programskom alatu PLEXOS kojega karakterizira izrazita fleksibilnost i mogućnost opisa elektroenergetskih sustava s manjim brojem ulaznih podataka, ali i dalje zadovoljavajućom kvalitetom optimizacije.

II. PROGRAMSKI PAKET

Simulator tržišta električne energije PLEXOS for Power Systems, proizvod australske tvrtke Energy Exemplar, odabran je za provođenje analiza u ovom radu kao trenutno jedan od najboljih dostupnih alata na tržištu. Njegova je prednost u tome što jednako dobro modelira i analizira tehničke karakteristike elektroenergetskog sustava i njegovih komponenata, kao i ekonomske zakonitosti tržišta. Može se prilagoditi različitim elektroenergetskim sustavima i modelima tržišta, a omogućava modeliranje mješovitih hidro-termo elektroenergetskih sustava, što je osobito bitno za hrvatski EES. Riječ je o simulacijsko-optimizacijskom alatu zasnovanom na objektnom modelu tržišta električne energije. Objektnim modelom definiran je skup klasa i njihova hijerarhija. Klasa objekata je skup pravila i definicija koji se odnose na pojedini tip objekata. Tijekom pripreme ulaznih podataka korisnik stvara jedinke objekata kojima se reprezentiraju pojedini elementi mreže i tržišta. Svi podržani elementi tržišta električne energije i postupka simulacije definirani su različitim klasama objektnog modela. Ovaj program je u stanju modelirati i pomoćne usluge sustava. Također, ima mogućnosti razmatranja složenijih ograničenja. Odlika simulacije tržišta električne energije prilično je velika količina potrebnih ulaznih podataka zbog čega je neophodan dio simulatora baza podataka. Format zapisa baza podataka koji se koristi u PLEXOS-u je XML (Extensible Markup Language), a kao dodatak ulaznoj bazi koriste se ulazne datoteke u tekstualnom formatu (CSV). PLEXOS omogućava korištenje nekoliko komercijalno dostupnih

solvera: MOSEK, Gurobi, Xpress-MP i CPLEX. Po završetku rješavanja matematičkog problema, PLEXOS iz dobivenih rješenja priprema podatke za pregled u grafičkom korisničkom sučelju za pregledavanje i analizu dobivenih rezultata.

III. PRORACHUN

Radi velikog broja podataka i zahtjevnog proračuna, sam proračun podijeljen je na dvije regije: Regija 1 - jugoistočna Europa i Regija 2 - srednja i istočna Europa, koje je u budućim analizama moguće spojiti u jedan model. Potrebni podaci za model elektroenergetskog sustava u programskom alatu PLEXOS mogu se pronaći u literaturi [VI. LITERATURA]. Zbog velike količine podataka i njihove opširnosti, u ovom članku nisu posebno navođeni podaci o svakoj elektrani zasebno, ali su uključeni u proračun i od izrazite su važnosti za dobivanje vjerodostojnih rezultata.

Alat za modeliranje tržišta kojim se analiziraju složenija pitanja poput širenja tržišta i ulaska novih proizvodnih kapaciteta mora biti sposoban analizirati ponašanje sustava kroz različita vremenska razdoblja. Duljina planskog razdoblja u PLEXOS-u nije ograničena, ali je jasno da se produljenjem razdoblja povećavaju nesigurnosti u sustavu. Nesigurnosti se odnose na sve elemente sustava i tržišta, pri čemu se mogu izdvojiti potrošnja električne energije, cijene energenata, ulazak novih proizvodnih i prijenosnih kapaciteta, model i pravila tržišta. U radu se razmatralo razdoblje od 15 godina (2016.-2030.) koje je prilično dugačko s obzirom na neizvjesnosti razvoja tržišta električne energije u regiji. Prilikom pokretanja simulacije, nakon pripreme podataka iz Microsoft Access baze i ulaznih tekstualnih podataka, koristi se biblioteka AMMO za dinamičku formulaciju matematičkog problema. Nakon što je problem formuliran, pokreće se solver CPLEX specijaliziran za rješavanje kompleksnih matematičkih optimizacijskih problema.

a. Jugoistočna Europa

Kao dio prve regije razmatrane su sljedeće zemlje: Crna Gora, Bosna i Hercegovina, Kosovo, Albanija, Srbija, Bugarska, Makedonija, Hrvatska te Grčka, ali samo kao dio tržišta. Za svaku od navedenih zemalja bilo je potrebno definirati i modelirati proizvodne kapacitete, postojeće i planirane, potrošnju električne energije, prijenosni sustav i prekogranične kapacitete prema dobivenim ulaznim podacima ([37]-[63]). Na internetskim stranicama ENTSO-e, udruženja europskih operatora prijenosnih sustava električne energije, javno su dostupni energetske profili ovih zemalja i preuzeti su neophodni podaci za izradu modela elektroenergetskih sustava. Hrvatski elektroenergetski sustav modeliran je najdetaljnije radi dostupnih podataka iz HEP-a i HOPS-a. Izrađeno je predviđanje potrošnje do 2050. godine, navedeni su instalirani proizvodni kapaciteti u svim zemljama i opisane su elektrane pomoću dostupnih tehničkih

podataka. Također je opisan i prijenosni sustav i prekogranični kapaciteti te su navedene i neke elektrane koje bi mogle biti izgrađene do 2030. godine. Provedena je dugoročna analiza rada regionalnog elektroenergetskog sustava za razdoblje od sljedećih 15 godina zaključno s 2030. godinom te usporedba stanja elektroenergetskog sustava u 2016. i 2030. godini.

b. Srednja i istočna Europa

Za srednju i istočnu Europu napravljen je sličan proračun koji uključuje Sloveniju, Mađarsku, Rumunjsku, Hrvatsku i tržišnu analizu za Italiju, Austriju i Ukrajinu. Uključena je potrošnja električne energije za svaku od navedenih zemalja do 2030. godine, udio goriva u proizvodnji, postojeći energetske izvori, interkonekcijski sustav te uvoz električne energije. Tržišta Italije, Austrije i Ukrajine predstavljaju mogućnost regionalnim sustavima za kupnju ili prodaju električne energije po tržišnim cijenama u tim državama. Količina kupljene električne energije ovisi o kapacitetu interkonekcijskih prijenosnih sustava. Podaci o svakom od pojedinih sustava mogu se naći u literaturi ([1]-[36])

IV. REZULTATI SIMULACIJE MODELA

Po završetku rješavanja problema, PLEXOS iz dobivenih rješenja matematičkog problema priprema podatke za pregled u sučelju za pregledavanje i analizu dobivenih podataka. Podaci koji su prikazani u radu su proizvodnja po elektranama svih promatranih zemalja, potrošnja, uvoz i izvoz energije prekograničnim vodovima i cijene u čvorištima. Za potrebe određivanja cijene u čvorištima, bilo je potrebno stvoriti ekvivalentna čvorišta pojedinih zemalja zbog toga što kod složenijih sustava s vrlo velikim brojem čvorišta, vodova i generatora model postaje izuzetno zahtjevan za izvršenje proračuna. Pomoću tih ekvivalentnih čvorišta, moguće je izračunati tržišnu cijenu za svaku od promatranih zemalja. Za svaki od ovih podataka napravljena je usporedba stanja iz 2016. godine i 2030. godine. Podaci o uvozu i izvozu energije gledani su preko prenesene električne energije prekograničnim vodovima. Rješenja simulacije ne ocrtavaju nužno realno stanje ovih elektroenergetskih sustava s obzirom da je PLEXOS prije svega simulator tržišta i ne uzima u obzir razne ekonomske i političke aspekte razvoja energetske sektora. Za model regije jugoistočna Europa analizirana su dva scenarija: bazni scenarij koji koristi trenutne cijene energenata na tržištu i scenarij ulaska zemalja regije u sustav trgovanja emisijama ETS (engl. Emission Trading System). Za model regije srednja i istočna Europa analizirana su dva scenarija: bazni scenarij te scenarij koji promatra situaciju u kojoj nisu dostupna vanjska tržišta.

Rezultati su prikazani s rezolucijom od 2 mjeseca.

a. Jugoistočna Europa - bazni scenarij

Crna Gora

Proizvodnja termoelektrana u Crnoj Gori iznosila je u opadanju od 2016. do 2030. godine (Slika IV-1), dok se istovremeno povećava proizvodnja hidroelektrana. Prosječna angažirana snaga elektrana u 2016. godini iznosila je 290 MW GWh, a u 2030. oko 350 MW. Potrošnja energije u Crnoj Gori narasla je s 3545 GWh u 2016. na 4022 GWh u 2030. Prosječna cijena u čvorištu Crne Gore iznosi 42,743 €/MWh.

Bosna i Hercegovina

Prosječna angažirana snaga elektrana u 2016. godini iznosila je 920 MW GWh, a u 2030. oko 750 MW. Prema rezultatima BiH je uvoznik električne energije u 2016. godini, a 2030. godine postaje još ovisnija o uvozu. Ova situacija u modelu je u kontradikciji sa stvarnim stanjem što zahtijeva dodatnu analizu i doradu modela. Prosječna cijena u čvorištu BiH iznosi 42,3958 €/MWh.

Kosovo

Proizvodnja u 2016. godini u Kosovu iznosila je oko 550 MW GWh, u 2030. godini iznosi oko 770 MW (Slika IV-3). Potrošnja električne energije u Kosovu 2016. godine iznosi 5876 GWh, a 2030. iznosi 7010 GWh. Od 2016. godine do 2030. godine izvoz se dosta povećao zbog povećanja proizvodnih kapaciteta u zemlji. Najveći uvoznik električne energije iz Kosova je Srbija. Prosječna cijena u čvorištu Kosova iznosi 42,6134 €/MWh.

Albanija

U razdoblju do 2030. godine, izgrađeno je dosta novih hidroelektrana koje povećavaju proizvodnju električne energije Albanije. U 2016. godini proizvodnja iznosi oko 490 MW, a u 2030. se proizvodnja povećala gotovo dvostruko i iznosi oko 920 MW (Slika IV-4). Potrošnja energije u 2016. godini iznosi 8358 GWh, a u 2030. godini iznosi 9566 GWh. U razmatranom periodu Albanija od uvoznika EE postaje izvoznikom. Izgradnjom novih hidroelektrana Albanija je počela proizvoditi više električne energije nego što je potrebno i može ju izvoziti. Prosječna cijena u čvorištu Albanije iznosi 42,6134 €/MWh.

Srbija

Proizvodnja u 2016. godini u Srbiji iznosi oko 2820 MW, a 2030. godine iznosi 2850 MW (Slika IV-5). Mnogo starih termoelektrana izlazi iz pogona do 2030. godine, ali u pogon ulazi novi blok termoelektrane Kostolac i nova termoelektrana na ugljen. Potrošnja električne energije u 2016. godini iznosi 35100 GWh, a 2030. iznosi 38252 GWh. Od 2016. godine do 2030. godine uvoz se povećao. Jasno je da je zbog izlaska iz pogona starih termoelektrana došlo do manjka proizvodnje pa je Srbija ovisna o uvozu električne energije. Prosječna cijena u čvorištu Srbije iznosi 42,743 €/MWh.

Bugarska

Prosječna proizvodnja u 2016. godini iznosi oko 2955 MW, a u 2030. godini iznosi oko 2510 MW (Slika IV-6).

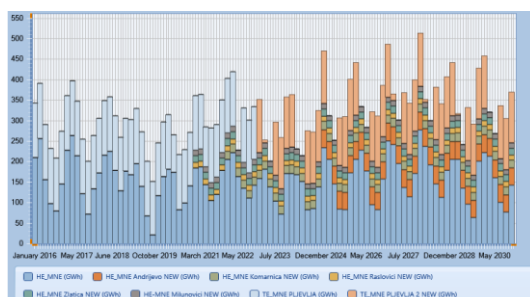
Dvije plinske elektrane pokrivaju vršna opterećenja, ali izlaze iz pogona krajem 2023. godine. Potrošnja u 2016. godini iznosi 37440 GWh, a 2030. godine iznosi 40626 GWh. U promatranom periodu Bugarska postaje sve ovisnija o uvozu EE. Prosječna cijena u čvorištu Bugarske iznosi 41,4705 €/MWh.

Makedonija

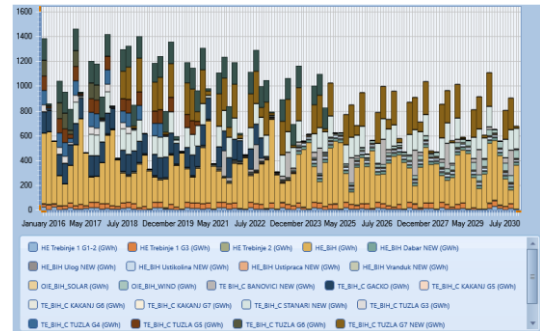
Proizvodnja u 2016. godini iznosi oko 680 MW, a u 2030. godini iznosi oko 1015 MW (Slika IV-7). Proizvodnja se povećala zbog izgradnje nove termoelektrane Bitola i dodatne termoelektrane na ugljen te nekoliko novih hidroelektrana. Potrošnja u 2016. godini iznosi 8265 GWh, a u 2030. iznosi 9589 GWh. Makedonija nakon izgradnje novih proizvodnih kapaciteta postaje izvoznikom EE. Prosječna cijena u čvorištu Makedonije iznosi 41,6311 €/MWh.

Hrvatska

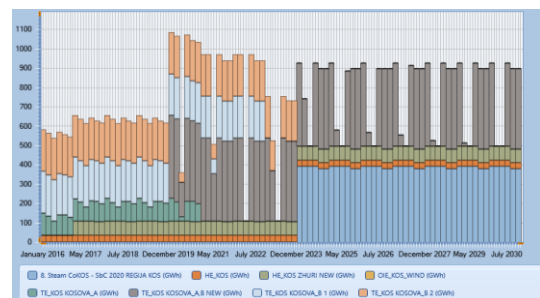
Proizvodnja električne energije u Hrvatskoj dolazi od mnogih hidroelektrana, nekoliko termoelektrana, a dio dolazi i od nuklearne elektrane Krško i obnovljivih izvora, vjetroelektrana i solarnih elektrana. Očekuje se povećanje proizvodnje iz solarnih i vjetroelektrana i u 2030. godini prosječna proizvodnja iznosi oko 330 MW. Proizvodnja u 2016. godini iznosi oko 900 MW, a u 2030. godini iznosi oko 1000 MW (Slika IV-8). Do povećanja proizvodnje dolazi zbog povećanja proizvodnog kapaciteta hidroelektrana, a povećana je i proizvodnja iz vjetroelektrana i solarnih elektrana. Zbog izlaska iz pogona termoelektrane Plomin i kogeneracijskih termoelektrana u Zagrebu i Sisku, smanjuje se njihova proizvodnja. U Hrvatskoj su modelirane 3 vrste hidroelektrana: reverzibilne, protočne i akumulacijske. Potrošnja u 2016. godini iznosi 17099 GWh, a u 2030. iznosi 19474 GWh. Hrvatska je izrazito ovisna o uvozu EE, a većina uvoza električne energije dolazi iz BiH. Prosječna cijena u čvorištu Hrvatske iznosi 43,4347 €/MWh.



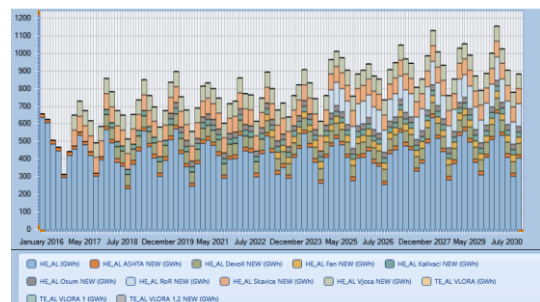
Slika IV-1 Ukupna proizvodnja elektrana Crne Gore



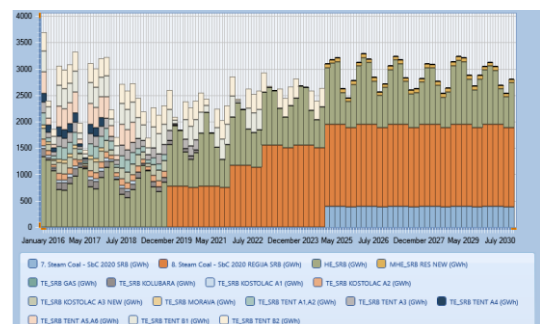
Slika IV-2 Ukupna proizvodnja elektrana u BiH



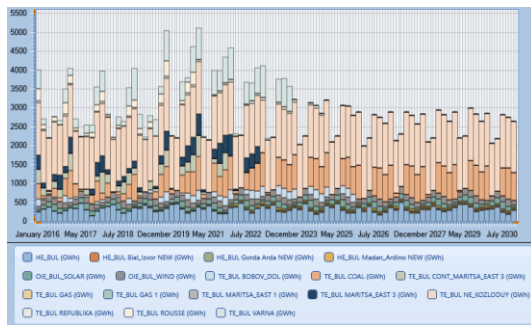
Slika IV-3 Ukupna proizvodnja elektrana u Kosovu



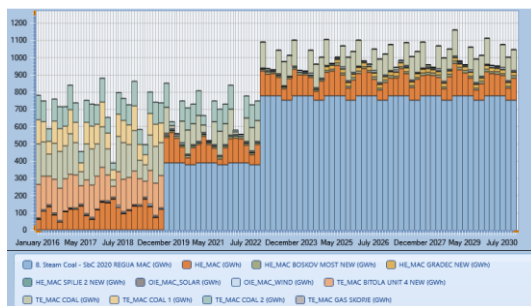
Slika IV-4 Ukupna proizvodnja elektrana u Albaniji



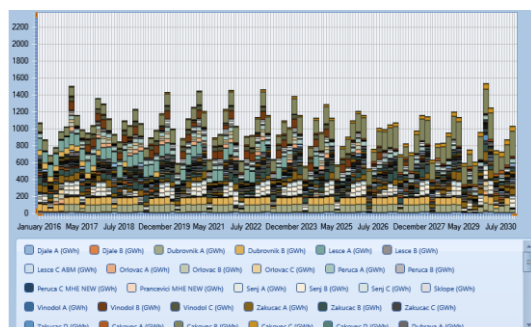
Slika IV-5 Ukupna proizvodnja elektrana u Srbiji



Slika IV-6 Ukupna proizvodnja elektrana u Bugarskoj



Slika IV-7 Ukupna proizvodnja elektrana u Makedoniji



Slika IV-8 Proizvodnja električne energije elektrana u Hrvatskoj

b. Jugoistočna Europa - ETS

U ovom scenariju razmatra se utjecaj cijena emisija na ukupnu cijenu električne energije. EU ETS, europski sustav trgovanja emisijama (engl. European Union Emissions Trading Scheme), prvi je sustav trgovanja emisijama stakleničkih plinova u svijetu i trenutno najveći sustav. Pokrenut je 2005. godine kao odgovor na klimatske promjene i globalno zagrijavanje. Pokriva više od 11000 tvornica i elektrana koje emitiraju toplinu veću od 20 MW. Zastupljen je u svim zemljama Europske Unije.

S obzirom na velik broj termoelektrana u BiH, utjecaj povećanja cijena emisija se osjeti: gledajući proizvodnju za 2016. godinu, nakon ulaska u ETS proizvodnja iz termoelektrana se smanjila za oko 200 MW, a 2030. se smanjuje za oko 150 MW. Utjecaj ulaska u ETS na

proizvodnju iz termoelektrana u Kosovu nije velik. U 2016. godini proizvodnja je približno ista, a u 2030. godini se tek neznatno smanjuje. Cijena u čvorištu Kosova se u slučaju ulaska u ETS povećava jer poskupljuje cijena električne energije koju proizvode termoelektrane. U Srbiji cijena emisija utječe na stare neefikasne termoelektrane smanjujući njihovu proizvodnju. Gledajući stanje u 2016. godini, proizvodnja se smanjila za oko 180 MW. Povećanje cijene ugljena ipak ne utječe na novu termoelektanu na ugljen koja je izgrađena u 2019. godini i proizvodnja u 2030. godini je jednaka. S obzirom da u Srbiji gotovo sve stare elektrane izlaze iz pogona do 2024. godine, nova elektrana se gradi da pokrije taj pad u proizvodnji. Cijena u čvoru Srbije nakon ulaska u ETS povećala se na 45 €/MWh zbog proizvodnje iz skupljih elektrana. U Makedoniji je situacija slična kao i u Srbiji: cijena u čvorištu također raste na 45 €/MWh. Utjecaj ulaska u ETS u Bugarskoj je znatan. Zbog povećanih cijena emisija, termoelektrane u 2016. godini proizvode oko 245 MW manje, a u 2030. je smanjenje nešto manje i iznosi oko 120 MW. U Bugarskoj nema izgradnje novih termoelektrana i do 2030. godine se suočava s manjkom proizvodnje pa je zato utjecaj cijena emisija manji u kasnijim godinama. Cijena u čvorištu se povećala na 45 €/MWh.

c. Srednja i istočna Europa

U ovom dijelu prikazana su rezultati za Mađarsku, Sloveniju, Hrvatsku i Rumunjsku.

Mađarska

Potražnja električne energije u Mađarskoj do 2030. godine će dosegnuti 5500 MW. Proizvodnja se sastoji od nuklearne elektrane Paks koja radi konstantno sve godine, obnovljivih izvora te TE na ugljen i plin. U 2026. godini i 2029. godini ulaze u pogon dva bloka nuklearne elektrane Paks 2 koje rade maksimalnim kapacitetom (Slika IV-9). Razliku između potrošnje i proizvodnje se zadovoljavaju uvozom iz susjednih država i tržišta poput Austrije, Slovenije, Ukrajine, Hrvatske ili Rumunjske. Termoelektrane na ugljen proizvode električnu energiju od oko 500 MW. Zbog proizvodnje skupljih termoelektrana cijena električne energije poraste, sve dok ne dođe do izgradnje dva bloka Paks 2, te se cijena normalizira na 40 €/MWh.

Slovenija

Proizvodnja električne energije iznosi oko 1400 MW, (Slika IV-10). Proizvodnja se sastoji od hidroelektrana, nuklearne elektrane Krško (hrvatski i slovenski udio), elektrane na obnovljive izvore, te termoelektrana Ljubljana i Šošanj. Termoelektrana na plin zbog visokih troškova proizvodnje ne ulazi u pogon. Slovenija ima proizvodnju veću od potrošnje, pa višak izvozi. Treba napomenuti da u ukupnoj proizvodnji ulazi i polovica proizvodnje hrvatskog dijela nuklearke Krško. Kretanje cijena električne energije jednaka je kao i u mađarskom elektroenergetskom sustavu, te su povišenja cijena

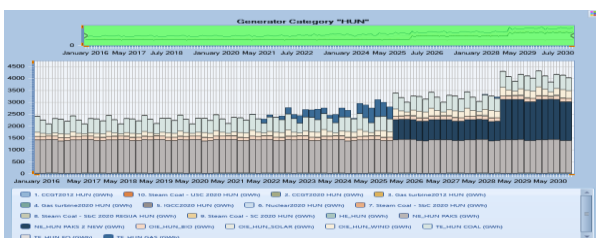
uzrokovani tržišnim cijenama u regiji zbog rada skupljih termoelektrana.

Hrvatska

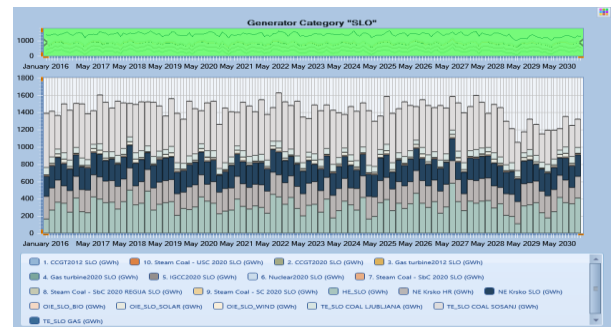
Prosječna godišnja proizvodnja električne energije u Hrvatskoj u razmatranom periodu dosta varira, a prosječno iznosi više od 1100 MW. Može se primijetiti da u Hrvatskoj potrošnja veća od proizvodnje, te je Hrvatska pretežno uvozna zemlja. Hrvatski elektroenergetski sustav spojen je sa Mađarskim i Slovenskim sustavom. Prosječna proizvodnja OIE naraste sa 70 MW u 2016. godini do oko 400 GWh u 2030. godini (Slika IV-11). Očekuje se da će kapacitet vjetroelektrana narasti do 1200 MW, te sunčanih elektrana do 300 MW do 2030. godine. Najveći rast proizvodnje čine vjetroelektrane, te biomasa. Godišnja proizvodnja iz hidroelektrana HE može varirati od oko 4500 GWh do 8500 GWh ovisno o hidrološkoj godini. Najveći udio u proizvodnji čine HE Zakućac, HE Dubrovnik, HE Senj, HE Orlovac. Proizvodnja termoelektrana utječe na ukupnu cijenu električne energije u regiji, tj. dolazi do povećanja cijene električne energije pri radu ovog tipa elektrana. Cijena električne energije je jednaka kao i kod mađarskog i slovenskog elektroenergetskog sustava.

Rumunjska

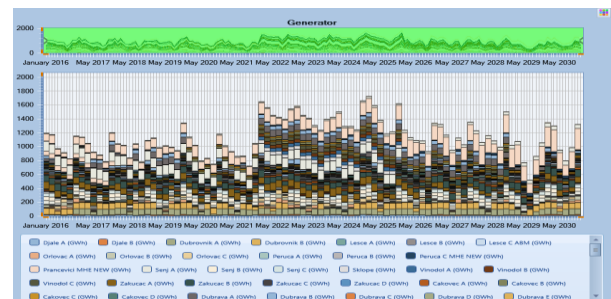
Proizvodnja blago varira i u prosjeku iznosi oko 5000 MW (Slika IV-12). Može se primijetiti da Rumunjska ima višak proizvedene električne energije te izvozi na ostala tržišta. Proizvodnju električne energije u Rumunjskoj čine hidroelektrane, obnovljivi izvori energije, termoelektrane na ugljen, te nuklearna elektrana. Rumunjska ima interkonekcijski prijenosni sustav sa Mađarskom i Ukrajinom. Rumunjska ima višak proizvedene električne energije, te izvozi u Mađarsku, dok uvozi jeftinu električnu energiju iz Ukrajine po cijeni od 39 €/MWh. U 2029. i 2030. godini zbog ulaska u pogon drugog bloka nuklearne elektrane Paks 2 dolazi do uvoza električne energije iz Mađarske. Pošto je tržišna cijena električne energije manja od troškova termoelektrana, Rumunjska uvozi električnu energiju iz Ukrajine.



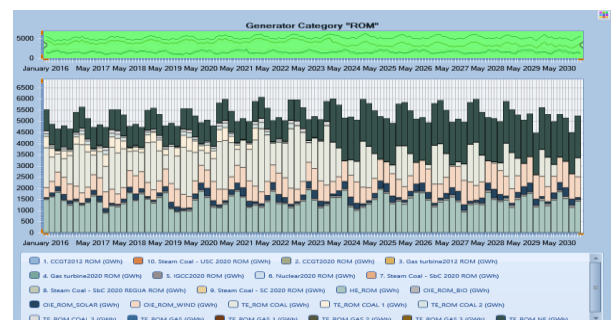
Slika IV-9 Proizvodnja električne energije po elektranama u Mađarskoj



Slika IV-10 Proizvodnja električne energije u Sloveniji



Slika IV-11 Proizvodnja električne energije u Hrvatskoj



Slika IV-12 Proizvodnja električne energije u Rumunjskoj

d. Regionalni sustav srednje i istočne Europe bez vanjskih tržišta

U ovom dijelu analiziran je utjecaj vanjskih tržišta na sustav: tržišta poput Italije koje je izvozno tržište, te tržišta Austrije i Ukrajine koja su uvozna tržišta za regionalni sustav. Cilj ovog dijela je analizirati ponašanje sustava bez mogućnosti uvoza jeftine električne energije, te izvoza u Italiju.

Mađarska

Povećana proizvodnja kod termoelektrana na plin, dok su ostale vrijednosti ostale približno iste. Dolazi do porasta proizvodnje termoelektrane na plin, dok je proizvodnja termoelektrana na ugljen minimalno narasla i to u 2029. i 2030. godini. Termoelektrana na plin je pokrila manjak nastao zatvaranjem austrijskog tržišta koji je služio za uvoz jeftinije električne energije, koju sada moraju pokriti

skuplje termoelektrane. Nakon zatvaranja tržišta došlo je do pada izvoza električne energije prema Sloveniji, te je došlo do povećanja tokova električne energije od Slovenije prema Mađarskoj. Nakon zatvaranja tržišta dolazi do velikog uvoza električne energije iz Hrvatske. Razlog tome je što u sustavu nema jeftine električne energije, tako da ulaze u pogon skuplje toplane u Hrvatskoj, te je Mađarska dužna uvoziti električnu energiju radi zadovoljavanja vlastite potrošnje. Cijena električne energije nakon zatvaranja tržišta iznosi oko 55 €/MWh.

Slovenija

Nakon analiziranja rezultata, vidi se da je proizvodnja nuklearne elektrane, termoelektrana na ugljen, te obnovljivih izvora energije jednake kao sa stvarnim stanjem koji je analiziran u prethodnom dijelu. Jedine promjene u slovenskom elektroenergetskom sektoru su cijena električne energije i tokovi energije. Dolazi do povećanja izvoza električne energije u Hrvatsku te pada uvoza električne energije iz Mađarske. Razlog tome je povećana potražnja električne energije u Hrvatskoj, a razlog pada uvoza električne energije su manjak potreba Slovenije zbog zatvaranja talijanskog tržišta na kojem su izvozili velike količine električne energije. Cijena električne energije nakon zatvaranja tržišta iznosi oko 55 €/MWh.

Hrvatska

Zbog manjka električne energije u regiji zbog zatvaranja tržišta, dolazi do rada skupljih elektrana u regiji, kao što su i termoelektrane na ugljen, te toplane u Hrvatskoj. Ukupna proizvodnja električne energije se povećala. Hrvatski elektroenergetski sustav je profitirao od zatvaranja tržišta. Proizvodnja električne energije iz hidroelektrana, termoelektrana, te toplana se povećala. Akumulacijske HE su povećale proizvodnju električne energije, tj. došlo je povećanja proizvodnje iz HE Zakućac. Proizvodnja električne energije iz protočnih HE je malo povećana, pogotovo kod većih HE poput HE Čakovec, HE Varaždin, HE Dubrava. Nakon zatvaranja tržišta formira se skuplja cijena električne energije koja ne pogoduje radu reverzibilnih HE. Proizvodnja električne energije iz reverzibilnih HE se blago smanjila za vrijeme skupe cijene električne energije, te nakon pada cijena električne energije zbog otvaranja nuklearne elektrane Paks2, dolazi do povećanja proizvodnje električne energije iz reverzibilnih HE. Zatvaranjem tržišta proizvodnja termoelektrana poraste. Nakon zatvaranja tržišta dolazi do povećanja proizvodnje toplana u Hrvatskoj. Zbog manjka električne energije zbog zatvaranja tržišta, toplane u Hrvatskoj imaju najmanji trošak proizvodnje u odnosu na ostale termoelektrane, te ulaze u pogon. Rad ovih toplana utjecat će na porast cijene električne energije u Hrvatskoj, Sloveniji, te Mađarskoj. Nakon zatvaranja tržišta dolazi do velikog izvoza električne energije u Mađarsku. Razlog tome je što u sustavu nema jeftine električne energije.

Rumunjska

Nakon zatvaranja tržišta dolazi do malog povećanja proizvodnje ukupne električne energije. Do povećanja proizvodnje dolazi zbog izvoza električne energije u Mađarsku. Povećanje proizvodnje električne energije dolazi kod termoelektrana. Tokovi električne energije između Mađarske i Rumunjske nisu se pretjerano promijenile. Cijena električne energije u Rumunjskoj iznosi 40 €/MWh, dok u nekim trenucima zbog uvoza električne energije iz Mađarske iznosi 55 €/MWh, te 30 €/MWh zbog gašenja termoelektrana iz pogona zbog manjka potražnje.

V. ZAKLJUČAK

U radu je modeliran elektroenergetski sustav regije jugoistočne, istočne i srednje Europe u programskom paketu PLEXOS. PLEXOS je složen alat koji zahtijeva mnoštvo ulaznih podataka o elektroenergetskom sustavu i njegovim komponentama. Kvaliteta ulaznih podataka je presudna za ispravno modeliranje sustava, iako je često do takvih podataka teško doći. Za Hrvatski elektroenergetski sustav bili su dostupni detaljniji podaci, za razliku od onih korištenih za sustave ostalih zemalja u regiji, stoga je i hrvatski sustav modeliran s više detalja. Ostali podaci preuzeti su sa internetskih stranica ENTSO-e i raznih dokumenata o strategijama razvitka elektroenergetskih sustava ovih zemalja. Od komponentata elektroenergetskog sustava, modelirane su one najbitnije, a to su generatori (u slučaju PLEXOS-a ekvivalenti elektrana), prijenosni vodovi, čvorišta, potrošnja, cijene energenata itd. Simulacije su provedene posebnim matematičkim solverom CPLEX koji je implementiran u PLEXOS-u i rezultati su prikazani u posebnom grafičkom sučelju za analizu. Nakon provedene analize, od rezultata su izdvojene proizvodnje elektrana u pojedinom sustavu, uvoz i izvoz energije prekograničnim vodovima, potrošnja u sustavima i cijene u čvorištima. Analiziran je i dodatni scenarij ulaska zemalja regije u sustav trgovanja emisijama ETS na način da je u ukupnu cijenu ugljena ili plina uključena i cijena emisija stakleničkih plinova koja povećava ukupnu cijenu proizvodnje energije iz termoelektrana što utječe na njihov rad i na rad cijelog sustava. Što se tiče Hrvatske, može se reći da je u boljoj situaciji od većine zemalja regije s obzirom na razvijenost elektroenergetskog sustava. Iako pretežno prevladavaju hidroelektrane, razvijaju se obnovljivi izvori poput vjetroelektrana i solarnih elektrana čime se prati politika europskih zemalja i ulaskom Hrvatske u EU, investicija će biti sve više. S obzirom na nedostupnost točnih ulaznih podataka, u modelu su korišteni oni podaci koji što realnije ocrtavaju trenutno stanje elektroenergetskih sustava regije. Uz to, PLEXOS ne uzima u obzir vladine politike i razne druge ekonomske čimbenike za razvitak elektroenergetskog sustava nego je isključivo simulator tržišta. S obzirom da nisu modelirana određena ograničenja poput troškova za gašenje termoelektrana,

penala za prekomjerni prijenos energije prijenosnim vodovima, vremena održavanja svih elektrana i dr., tako i podaci o izgradnji novih elektrana i podaci o uvozu i izvozu električne energije ne ocrtavaju stvarno stanje na tržištu električne energije. Unošenjem tih i mnogih drugih detaljnijih podataka moguće je poboljšanje ovog modela i dobivanje puno realnije slike o stanju elektroenergetskih sustava zemalja jugoistočne, istočne i srednje Europe.

Potrebno je još jednom na kraju naglasiti da su navedeni rezultati tek ilustrativne naravi i u trenutnoj fazi razvoja regionalnog modela nemaju garantiranu praktičnu upotrebu budući da model nije prošao fazu validacije. Stoga se kao smjernice budućeg rada postavljaju ujedinjavanje spomenuta dva modela te verifikacija i validacija modela.

VI. LITERATURA

- [1] Projekt podrške direktnom financiranju održivih energetskih sistema zapadnog Balkana: Jačanje institucionalnih kapaciteta; Projekt broj 18: Bosna i Hercegovina: Dispečiranje vjetroelektrana i analiza operativnih troškova; Draft izvještaj, Energetski institut Hrvoe Požar, studeni 2012, str. broj 41
- [2] <http://www.seng.si/zgodovina/>, 15.05.2016
- [3] <https://www.entsoe.eu/Pages/default.aspx>, 15.05.2016
- [4] http://www.seng.si/zgodovina/obdobje_po_osamosvojitvi/, 15.05.2016
- [5] https://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearna_elektrana_Kr%C5%A1ko 15.05.2016
- [6] <http://www.dem.si/sl-si/> 15.05.2016
- [7] <http://www.sel.si/> o 15.05.2016
- [8] http://www.seng.si/hidroelektrarne/predstavitev_hidroelektrarn/ 15.05.2016
- [9] <http://www.eles.si/> 15.05.2016
- [10] <http://proizvodnja.hep.hr/proizvodnja/povijest/default.aspx> 16.05.2016
- [11] <http://www.hep.hr/opskrba/ienergije.aspx> 16.05.2016
- [12] https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane_u_Hrvatskoj 16.05.2016
- [13] <http://proizvodnja.hep.hr/proizvodnja/osnovni/termoelektrane/default.aspx> 16.05.2016
- [14] https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj 16.05.2016
- [15] https://hr.wikipedia.org/wiki/Sun%C4%8Deva_energija_u_Hrvatskoj 16.05.2016
- [16] <http://www.hops.hr/wps/portal/hr/web/hees> 16.05.2016
- [17] <http://villany.uw.hu/> 16.05.2016
- [18] https://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearna_elektrana_Paks 18.05.2016
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_power_stations_in_Hungary 18.05.2016
- [20] <http://enipedia.tudelft.nl/wiki/Hungary/Hydro> 18.05.2016
- [21] <http://enipedia.tudelft.nl/wiki/Hungary/Biomass> 18.05.2016
- [22] <http://enipedia.tudelft.nl/wiki/Hungary/Wind> 18.05.2016
- [23] <https://www.mavir.hu/web/mavir/home> 20.05.2016
- [24] <http://www.transelectrica.ro/> 20.05.2016
- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_power_stations_in_Romania 20.05.2016
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Cernavod%C4%83_Nuclear_Power_Plant 20.05.2016
- [27] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_wind_farms_in_Romania 22.05.2016
- [28] https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/quarterly_report_on_european_electricity_markets_q1_2015.pdf 20.05.2016
- [29] http://www.nek.si/hr/o_nek_u/proizvodnja/
- [30] http://www.ekosola.si/uploads/2010-08/4_Ucni_list_Hidroelektrarna.pdf
- [31] http://www.foropa.eu/files/country_reports/Country_Report_Slovenia.pdf
- [32] <http://www.hep.hr/opskrba/ienergije.aspx>
- [33] https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane_u_Hrvatskoj
- [34] <http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Vjetar%20prezentacija.pdf>
- [35] <http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Sunce%20prezentacija.pdf>
- [36] https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_in_Romania#/media/File:SolarGIS-Solar-map-Romania-en.png
- [37] Strategija razvoja energetike Crne Gore do 2030. godine, Ministarstvo ekonomije, Podgorica, 2014.

- [38] Smajević, Bašić, Vućina i sur., Strateški plan i program razvoja energetskeg sektora Federacije BiH, Sarajevo, 2008.
- [39] Izvještaj o radu, DERK, Tuzla, 2015.
- [40] Energy Strategy of the Republic of Kosovo 2013-2022, Ministarstvo ekonomskog razvoja, Prishtina, 2013.
- [41] Strategy for Energy Development in the Republic of Macedonia until 2030., Ministarstvo ekonomije, Skopje, 2010.
- [42] Granić, Pešut, Jelavić i sur., Strategija razvitka Republike Hrvatske, Institut Hrvoje Požar
- [43] Energy regulator authority, Annual Report, "Power Sector Situation and ERE Activity for 2013"
- [44] Elektroprivreda Srbije, <http://www.eps.rs/Eng/index.aspx>, 1.7.2016.
- [45] Akcioni plan Federacije BiH za korištenje obnovljivih izvora energije, Federalno ministarstvo energije, rudarstva i industrije, 2014.
- [46] "Energetski potencijal u BiH", siječanj 2015.
- [47] Indikativni plan razvoja proizvodnje 2016-2025, NOSBiH, 2015.
- [48] Nikolaev, Angel, "Renewable energy development in Bulgaria," rujan, 2007.
- [49] Tafrov D., Investment Opportunities in the Power Sector of Bulgaria, Sofia: Natsionalna Elektricheska Kompaniea – EAD, 2001.
- [50] Mapa Resursa, Ministarstvo Ekonomije, Vlada Crne Gore, kolovoz, 2011.
- [51] Energetski bilans Crne Gore za 2015. godinu, Vlada Crne Gore, Podgorica, 2014.
- [52] Izvještaj o stanju energetskeg sektora Crne Gore u 2013. godini, Regulatorna agencija za enetiku, Podgorica, 2014.
- [53] Energija u Hrvatskoj 2013, Ministarstvo gospodarstva, 2013.
- [54] Statement of Security of Supply for Kosovo, Energy Regulatory Office, Prishtina, 2013.
- [55] Strategic and Development Projects of the Electricity Power Industry od Serbia, PE Electric Power Industry of Serbia, Belgrade, 2011.
- [56] ENTSO-e, <https://www.entsoe.eu/Pages/default.aspx>, 1.7.2016.
- [57] ENTSO-e Transparency Platform, <https://transparency.entsoe.eu/>, pristupljeno 1.7.2016.
- [58] PLEXOS Integrated Energy Model, <http://energyexemplar.com/software/plexos-desktop-edition/>, 1.7.2016.
- [59] Global Energy Observatory, <http://globalenergyobservatory.org/select.php?tgl=Edit>, 1.7.2016.
- [60] Country Nuclear Power Profiles Bulgaria, <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Bulgaria/Bulgaria.htm>, 1.7.2016.
- [61] Nuclear Power in Bulgaria, <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/bulgaria.aspx>, 1.7.2016.
- [62] HOPS, <https://www.hops.hr/wps/portal/hr/web>, 1.7.2016.
- [63] Wind Energy Market Intelligence, http://www.thewindpower.net/country_en_45_croatia.php, 1.7.2016.