

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Anamarija Šare**

Zagreb, 2012. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**UTJECAJ ELEKTRIFIKACIJE  
TRANSPORTA NA KRIVULJU  
POTROŠNJE ELEKTRIČNE  
ENERGIJE I INTEGRACIJU  
OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE U  
DUBROVAČKOJ REGIJI**

Mentori:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Anamarija Šare

Zagreb, 2012. godina.

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

Ovaj rad je rađen u sklopu i-RESEV projekta financiranog od strane Hrvatske zaklade za znanost koja je potakla istraživanja i omogućila prikupljanje podataka, bez čega ovaj rad ne bi bio moguć no izneseni podaci i rezultati niti u kom slučaju ne održavaju stajališta HRZZ-a.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Nevenu Duiću i prof. dr. sc. Jošku Deuru na pruženoj prilici za rad na ovoj temi, te pomoći i savjetima pri izradi rada. Posebne zahvale upućujem asistentu dr. sc. Goranu Krajačiću koji mi je svojim savjetima pomogao i usmjeravao me tijekom izrade rada, na korisnim raspravama i strpljenju, kao i pomoći za prikupljanje potrebnih podataka i literature.

Svakako se želim zahvaliti djelatnicima DHMZ koji su ustupili mjerene podatke za vjetar i Sunčevo zračenje s mjernih postaja u Dubrovniku. Zahvale upućujem gđi. Veri Djokaj iz razvojne agencije DURA iz Dubrovnika koja je pribavila Prometnu studiju Grada Dubrovnika. Zahvaljujem se i djelatnicima Elektrojuga, operatoru distribucijskog sustava za područje Dubrovnika, koji su mi izašli u susret i omogućili prikupljanje mjerni podataka o potrošnji električne energije i ljubazno odgovarali na sva moja pitanja. Zahvaljujem se i djelatnicima HE Dubrovnik na pruženoj pomoći i pribavljanju podataka o proizvodnji hidroelektrane. Zahvale upućujem MUP, Policijskoj upravi dubrovačko- neretvanskoj za podatke o vozilima. Svim njima upućujem iskrene zahvala jer bez njihove pomoći ovaj rad ne bi bio izvediv.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci i razumijevanju, a posebice svojoj sestri i cimerici Matei na pomoći i razumijevanju prilikom izrade rada.

Zahvaljujem se svojim prijateljima na podršci i razumijevanju i svojim kolegama na iskazanoj pomoći, a osobito kolegi Tomislavu.

Anamarija Šare



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

**SADRŽAJ**

|   |      |
|---|------|
| SADRŽAJ .....   | I    |
| POPIS SLIKA .....   | III  |
| POPIS TABLICA .....   | V    |
| POPIS OZNAKA .....  | VI   |
| SAŽETAK .....   | VIII |
| SUMMARY .....   | IX   |
| 1. UVOD .....   | 1    |
| 2. METODOLOGIJA.....  | 4    |
| 2.1. Metodologija prvog pristupa .....  | 7    |
| 2.2. Metodologija drugog pristupa .....   | 8    |
| 3. PRIKUPLJANJE I OBRADA PODATAKA .....   | 9    |
| 3.1. Prikupljanje i obrada podataka o potrošnji električne energije .....                           | 9    |
| 3.2. Prikupljanje i obrada podataka o proizvodnji iz HE Dubrovnik .....                             | 10   |
| 3.3. Prikupljanje i obrada podataka o energiji Sunčeva zračenja .....                               | 11   |
| 3.4. Prikupljanje i obrada podataka o energiji vjetra.....  | 12   |
| 3.5. Prikupljanje i obrada podataka o vozilima .....  | 14   |
| 4. IZRADA PRORAČUNA UTJECAJA PENETRACIJE EV NA SATNU KRIVULJU<br>POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE..... | 16   |
| 4.1. Potrošnja električne energije do 2050. godine .....  | 17   |
| 4.2. Penetracija električnih vozila do 2050. godine.....  | 19   |
| 4.2.1. Vozni ciklusi i ciklusi punjenja EV .....  | 20   |
| 4.2.1.1. Punjenje EV na temelju pretpostavljenih voznih ciklusa .....                               | 20   |
| 4.2.1.2. Punjenje EV na temelju krivulje opterećenja prometa.....                                   | 22   |
| 4.3. Utjecaj elektrifikacije transporta na krivulju potrošnje električne energije .....             | 25   |
| 4.3.1. Scenarij za 2020. godinu .....   | 26   |
| 4.3.2. Scenarij za 2030. godinu .....   | 28   |
| 4.3.3. Scenarij za 2050. godinu .....   | 29   |
| 4.4. Model regulacije punjenja EV .....   | 30   |
| 5. REZULTATI PRORAČUNA.....   | 33   |
| 5.1. Rezultati scenarija za 2020. godinu .....  | 33   |
| 5.2. Rezultati scenarija za 2030. godinu .....  | 34   |
| 5.3. Rezultati scenarija za 2050. godinu .....  | 36   |
| 5.4. Osvrt na utjecaj uvođenja EV na potrošnju električne energije u u Republici<br>Hrvatskoj.....  | 37   |
| 6. OPTIMIZACIJA ENERGETSKOG SUSTAVA DUBROVAČKE REGIJE POMOĆU<br>PROGRAMA EnergyPLAN.....            | 39   |
| 6.1. Ulazni podaci za proračun u EnergyPLAN-u.....  | 40   |
| 6.1.1. Unos podataka o proizvodnji električne energije .....  | 41   |

---

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 6.1.2.   | Unos podataka o potrošnji električne energije .....                 | 42 |
| 6.1.3.   | Podaci o EV i potrošnja električne energije za punjenje EV.....     | 44 |
| 6.1.3.1. | Proračuni početnih ulaznih podataka .....                           | 46 |
| 6.1.3.2. | Razmatranje modeliranja baterije i punjenje prije isključenja ..... | 47 |
| 6.1.3.3. | Modeliranje V2G vozila .....  | 48 |
| 6.2.     | Modeli punjenja EV.....   | 49 |
| 7.       | REZULTATI SIMULACIJA U EnergyPLAN-u .....                           | 54 |
| 7.1.     | Rezultati scenarija za 2020. godinu .....                           | 54 |
| 7.2.     | Rezultati scenarija za 2030. godinu .....                           | 56 |
| 7.3.     | Rezultati scenarija za 2050. godinu .....                           | 57 |
| 7.4.     | Utjecaj penetracije EV i OIE na CEEP .....                          | 59 |
| 8.       | ZAKLJUČAK.....  | 61 |
|          | LITERATURA.....   | 64 |
|          | PRILOZI .....   | 69 |

## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Prikaz odnosa komponenti prvog i drugog pristupa.....  | 4  |
| Slika 2.  | Tri osnovna koraka izvođenja rada .....  | 5  |
| Slika 3.  | Dijagram toka postupka.....  | 6  |
| Slika 4.  | Tijek dva osnovna koraka prvog pristupa.....   | 7  |
| Slika 5.  | Krivulja prosječnih satnih vrijednosti potrošnje električne energije za šire dubrovačko područje, 2010. godina .....   | 10 |
| Slika 6.  | Satne vrijednosti proizvodnje HE Dubrovnik za 2010. godinu .....   | 11 |
| Slika 7.  | Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem na području Republike Hrvatske .....  | 11 |
| Slika 8.  | Krivulja prosječnih satnih vrijednosti dozračene energije Sunca globalnog zračenja na ravnu plohu na području Dubrovnika za 2010. godinu.....                    | 12 |
| Slika 9.  | Prosječne satne vrijednosti brzina vjetra na području Dubrovnika, 2010. godina.  | 13 |
| Slika 10. | Weibull-ova krivulja raspodjele brzina vjetra.....   | 14 |
| Slika 11. | Prosječne brzine vjetra za mjesece u 2010. godini .....  | 14 |
| Slika 12. | Godišnja proizvodnja vjetroturbina za instaliranu snagu od 6 MW .....  | 14 |
| Slika 13. | Struktura registriranih motornih vozila u Dubrovniku [15] .....  | 15 |
| Slika 14. | Potrošnja električne energije za područje Dubrovnika za specifičan radni dan u tjednu u 2010. godini.....  | 18 |
| Slika 15. | Satne krivulje potrošnje električne energije za 2020., 2030. i 2050. godinu.....   | 18 |
| Slika 16. | Dnevna potrošnja električne energije za punjenje EV svaki od scenarija.....  | 22 |
| Slika 17. | Krivulja opterećenja prometa na području Dubrovnika [15].....  | 23 |
| Slika 18. | Postotak parkiranih vozila i broj putovanja za sve dane u tjednu [33].....   | 24 |
| Slika 19. | Krivulja dnevne potrošnje električne energije za punjenje EV za sve scenarije ...  | 24 |
| Slika 20. | Satna krivulja potrošnje električne energije za punjenje EV u 2020. godini.....  | 25 |
| Slika 21. | Ukupna godišnja potrošnja električne energije za punjenje EV za svaki pojedini scenarij.....   | 26 |
| Slika 22. | Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2020. godini za specifičan radni dan.....   | 27 |
| Slika 23. | Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2020. godini za specifičan dan vikenda .....  | 27 |
| Slika 24. | Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2030. godini za specifičan radni dan.....   | 28 |
| Slika 25. | Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2030. godini za specifičan dan vikenda .....  | 28 |
| Slika 26. | Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2050. godini za specifičan radni dan.....   | 29 |
| Slika 27. | Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2050. godini za specifičan dan vikenda .....  | 29 |
| Slika 28. | Dnevna potrošnja električne energije s granicama punjenja EV .....   | 31 |
| Slika 29. | Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan radni dan u 2020. godini .....  | 33 |
| Slika 30. | Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan dan vikenda u 2020. godini..... | 34 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 31. | Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan radni dan u 2030. godini .....   | 35 |
| Slika 32. | Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan dan vikenda u 2030. godini ..... | 35 |
| Slika 33. | Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan radni dan u 2050. godini .....   | 36 |
| Slika 34. | Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan dan vikenda u 2050. godini ..... | 36 |
| Slika 35. | Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2050. godini za specifičan radni dan.....  | 38 |
| Slika 36. | Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2030. godini za specifičan dan vikenda .....   | 38 |
| Slika 37. | Unos podataka o proizvodnji električne energije iz OIE.....   | 41 |
| Slika 38. | Unos podataka o potrošnji električne energije u EnergyPLAN .....  | 42 |
| Slika 39. | Unos podataka o karakteristikama baterije EV i potrošnji električne energije za njihovo punjenje.....   | 45 |
| Slika 40. | Krivulje potrošnje električne energije u transportu za sve obrađene modele punjenja EV .....  | 51 |
| Slika 41. | Dijagrami satne distribucije krivulje potrošnje s obzirom na postotak raspoloživog priključka EV .....  | 53 |
| Slika 42. | Distribucija krivulje potrošnje za pretpostavljena dva modela punjenje EV u 2020. godini .....  | 55 |
| Slika 43. | Utjecaj punjenja EV na satnu krivulje potrošnje za pretpostavljena dva modela punjenje EV u 2030. godini .....  | 56 |
| Slika 44. | Utjecaj punjenja EV na satnu krivulje potrošnje za pretpostavljena dva modela punjenje EV u 2050. godini .....  | 58 |
| Slika 45. | Povećanje kritičnog višaka proizvodnje s penetracijom OIE u energetsom sustavu, usporedba scenarija s EV u sustavu i bez njih.....                                | 60 |



**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Vrste vjetroturbina i njihove karakteristike .....  | 13 |
| Tablica 2. Potrošnja električne energije za Hrvatsku i Dubrovnik do 2050. godine .....   | 17 |
| Tablica 3. Broj osobnih vozila u Hrvatskoj i Dubrovniku u 2010. godini .....   | 19 |
| Tablica 4. Broj električnih vozila u Hrvatskoj i Dubrovniku za svaki od budućih scenarija ..   | 19 |
| Tablica 5. Odabrane vrste električnih vozila i njihove karakteristike .....  | 20 |
| Tablica 6. Broj punjenja vozila u jednom danu i broj vozila na raspolaganju za punjenje za sve vrste EV .....  | 21 |
| Tablica 7. Formule za izračun granica punjenja između maksimalne i minimalne vrijednosti dnevne krivulje potrošnje električne energije .....                               | 31 |
| Tablica 8. Utjecaj potrošnje električne energije za punjenje EV na vršno opterećenje satne krivulje potrošnje .....  | 38 |
| Tablica 9. Utjecaj pretpostavljenih modela punjenja EV na krivulju potrošnje električne energije i na kritični višak proizvedene električne energije u 2020. godini .....  | 55 |
| Tablica 10. Utjecaj pretpostavljenih modela punjenja EV na krivulju potrošnje električne energije i na kritični višak proizvedene električne energije u 2030. godini ..... | 57 |
| Tablica 11. Utjecaj pretpostavljenih modela punjenja EV na krivulju potrošnje električne energije i na kritični višak proizvedene električne energije u 2050. godini ..... | 59 |
| Tablica 12. Utjecaj potrošnje električne energije za punjenje EV na vršno opterećenje satne krivulje potrošnje .....   | 61 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka        | Jedinica | Opis   |
|---------------|----------|--|
| $C_{CEEP}$    | kWh/sat  | Višak proizvodnje električne energije  |
| $C_{Charger}$ | kW       | Opterećenje priključka na mrežu  |
| $C_{FX}$      | kW       | Maksimalna instalirana snaga (fleksibilna potrošnja)                             |
| $C_{NT}$      | kn/kWh   | Cijena električne energije po niskoj tarifi                                      |
| $C_{VT}$      | kn/kWh   | Cijena električne energije po visokoj tarifi                                     |
| $C_{V2G}$     | kW       | Maksimalna snaga baterije V2G vozila   |
| $c_{V2G}$     | kWh/sat  | Maksimalna snaga baterije V2G vozila u satu                                      |
| $D_{BEV}$     | GWh/god. | Godišnja potrošnja električne energije za punjenje baterije EV (BEV)             |
| $d_{BEV}$     | kWh/sat  | Satna potrošnja električne energije za punjenje baterije EV (BEV)                |
| $D_E$         | GWh/god. | Godišnja potrošnja električne energije   |
| $d_E$         | kWh/sat  | Satna potrošnja električne energije  |
| $D_{FXDay}$   | GWh/god. | Godišnja potrošnja električne energije fleksibilna za razdoblje od jednog dana   |
| $D_{FXWeek}$  | GWh/god. | Godišnja potrošnja električne energije fleksibilna za razdoblje od jednog tjedna |
| $D_{FX4Week}$ | GWh/god. | Godišnja potrošnja električne energije fleksibilna za razdoblje od četiri tjedna |
| $d_{Total}$   | kWh/sat  | Ukupna satna potrošnja električne energije                                       |
| $D_{V2G}$     | GWh/god. | Godišnja potrošnja električne energije za V2G vozila i ili BEV pametno punjenje  |
| $d_{V2G}$     | kWh/sat  | Satna potrošnja električne energije za V2G vozila i ili BEV pametno punjenje     |
| $e_{Charge}$  | kWh/sat  | Električna energije punjenja u satu  |
| $E_{EV,i}$    | kWh/sat  | Satna potrošnja električne energije za punjenje EV                               |
| $E_{G,m}$     | kWh      | Granična potrošnja električne energije za punjenje EV                            |
| $e_{Inv}$     | kWh/sat  | Pražnjenje baterije u satu   |
| $E_{K,i}$     | kWh/sat  | Satna potrošnja električne energije (podaci s trafostanice Komolac)              |
| $e_{PP}$      | kWh/sat  | Satna proizvodnja električne energije  |
| $e_{Res}$     | kWh/sat  | Satna proizvodnja električne energije iz OIE                                     |
| $e_{Res1}$    | kWh/sat  | Satna proizvodnja električne energije iz vjetra                                  |
| $e_{Res2}$    | kWh/sat  | Satna proizvodnja električne energije iz Sunčeva zračenja                        |
| $e_{Res3}$    | kWh/sat  | Satna proizvodnja električne energije hidroelektrane                             |

|                          |         |   |
|--------------------------|---------|---|
| $e_{Total}$              | kWh/sat | Ukupna satna proizvodnja električne energije  |
| $E_{UK,i}$               | kWh/sat | Ukupna satna potrošnja električne energije (uključuje potrošnju za punjenje vozila) |
| $S_{V2G-Battery}$        | MWh     | Kapacitet spremnika baterije  |
| $S_{V2G-Battery}$        | kWh/sat | Kapacitet spremnika baterije  |
| $S_{V2G-Battery-min}$    | kWh/sat | Minimalni kapacitet spremnika baterije  |
| $T_i$                    | kn      | Trošak potrošnje električne energije u satu   |
| $T_{min}$                | kn      | Minimalni trošak potrošnje električne energije                                      |
| $t_{V2G}$                | kWh/sat | Satna potrošnja električne energije za pražnjenje V2G vozila                        |
| $V2G_{Connection-Share}$ | %       | Udio parkiranih V2G vozila spojenih na mrežu  |
| $V2G_{MaxShare}$         | %       | Maksimalni udio vozila u vožnji u satu vršnog opterećenja                           |
| $\delta_{V2G}$           | -       | Distribucija potrošnje u transportu   |
| $\eta_{CHARGE}$          | -       | Učinkovitost pražnjenja baterije  |
| $\mu_{Charge}$           | -       | Efikasnost punjenja (punjač)  |
| $\mu_{Inv}$              | -       | Efikasnost baterije spojene na mrežu (inverter)                                     |

## SAŽETAK

U cilju smanjenja emisija stakleničkih plinova u atmosferu, nastoji se konvencionalna goriva zamijeniti proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije (OIE). Tehnologije koje zauzimaju najviše pažnje odnose se na uvođenje različitih vrsta električnih vozila (EV) u transportne sustave i korištenje OIE u energetske sustavima. Povezivanjem ove dvije tehnologije u jedan elektroenergetski sustav (EES), omogućuje se skladištenje proizvodnje električne energije iz intermitentnih izvora, kakvi su OIE, u baterije električnih vozila koji predstavljaju spremnike električne energije. Ispitivanje i analiza tih tehnologija tema su ovog rada.

Svrha rada je ispitati utjecaj elektrifikacije transporta na krivulju potrošnje električne energije i integraciju OIE u EES Dubrovačke regije. Rad se temeljio na dva pristupa. Prvi pristup usmjeren je na optimizaciju punjenja EV i njegov sustav kontrole s ciljem smanjenja troška električne energije i izravnjanja satne krivulje potrošnje. Praćenjem praćenjem opterećenja prometa i ciklusa punjenja EV dobio se njihov utjecaj na satnu krivulju potrošnje električne energije. Cilj je odrediti sustave kontrole punjenja EV koji neće utjecati na povećane troškove električne energije niti na povećanje vršne potrošnje. Drugi pristup odnosi se na planiranje cjelokupnog energetske sustava, čiji je cilj optimizirati komponente sustava za poznatu satnu distribucijsku krivulju potrošnje i proizvodnje električne energije, koja uključuje proizvodnju iz OIE. Ulogu u regulaciji odnosa između proizvodnje i potrošnje u EES, imala su EV kroz različite modele punjenja. Proračuni i ispitivanja za prvi i drugi pristup, provedena su za tri scenarija za 2020., 2030. i 2050.. 2010. godina uzeta je kao referentan godina.

Analizom rezultata utvrdilo se da neregulirano punjenje EV negativno utječe na distribuciju krivulje potrošnje, dok regulacija punjenja smanjuje trošak električne energije i utjecaj na vršnu potrošnju. Ispitivanjem modela punjenja u EnergyPLAN programu utvrdilo se da se EES, s manjom penetracijom OIE u sustavu, bolje regulira pametnim punjenjem zbog manjeg utjecaja na višak proizvodnje električne energije (2020., 2030.), dok u sustavu s visokom penetracijom OIE (2050.), fleksibilna potrošnja ima manji utjecaj na višak proizvodnje od vozila-na mreži. Utvrdilo se da ispitani EES s EV imaju manji utjecaj na višak proizvodnje električne energije od istih tih sustava bez EV.

Ključne riječi: električna vozila, vozilo-na-mreži (V2G), obnovljivi izvori energije, električni distribucijski sustav, pametno punjenje

## **SUMMARY**

In order to reduce greenhouse emissions, governments seek to replace conventional fuels with the production from renewable energy sources (RES). Technologies garnering the most attention are various types of electric vehicles (EV) in transportation systems and the use of renewable energy in power systems. Linking these two technologies into one power system offers a storage of electricity production from intermittent sources, such as wind or solar, into the battery of EV, which serve as electricity storage. The testing and analysis of these technologies are the subject matter of this work.

The purpose of this thesis is to examine the impact of electrification in the transport sector on the power curve and the integration of RES in power systems of the Dubrovnik region. The following addresses two approaches. The first approach focuses on optimization of the EV charging and its control in order to reduce electricity cost and to flatten the hourly power curve. The monitoring of EV driving and charging cycles led to their influence on the hourly power curve. The goal is to determine the control systems of charging EV in order to reduce the increase of electricity costs and peak demand. The second approach relates to the organized planning of the energy system as a whole, aiming to optimize system components for the known hour distribution curve and electricity production, including RES production. Different models of EV charging regulate the relationship between system production and electrical consumption. Calculations and tests are to be conducted for three scenarios—2020, 2030 and 2050, for both the first and second approaches. Year 2010 will be used as the reference year. The results analysis show that dump charge negatively affects the distribution power curve, while smart charge reduces energy costs and the impact on peak demand. The analysis of different EV charging models in EnergyPLAN program concludes that the power system with lower RES penetration has better regulation including smart charging when it comes to critical excess of electricity production (CEEP), (in 2020 and 2030); while in 2050., flexible demand yields better results than vehicles-to-grid because of higher RES penetration in the system. It has also been shown that energy systems including EV have a greater impact on CEEP reduction than the ones excluding EV.

Key words: Electric vehicles, Vehicles-to-grid, Renewable sources of energy, Electric distribution system, Smart charge

## 1. UVOD

Prema Kyotskom protokolu, Europska zajednica (EZ) se obvezala na postizanje ciljeva u smanjenju emisija stakleničkih plinova za razdoblje od 2008. do 2012. godine. Zajednica se isto tako obvezala da će do 2020., emisije stakleničkih plinova u kontekstu globalnog sporazuma, smanjiti za 30% i unilateralno za 20%. Svoj doprinos ostvarenju tih ciljeva morat će dati svi sektori. Jedan vid emisija stakleničkih plinova iz prometa Zajednica rješava kroz svoju politiku o emisijama i vozilima. Uporaba goriva u prometu značajno doprinosi sveukupnim emisijama stakleničkih plinova u Zajednici. Prometni sektor u Europskoj Uniji sudjeluje s udjelom od 31,7% u ukupnoj finalnoj potrošnji energije [1], dok s udjelom od 20% sudjeluje u ukupnim emisijama stakleničkih plinova [2]. Pristupanjem Europskoj Uniji Hrvatska je preuzela obveze iz Direktive 2009/28/EZ, koje između ostaloga traže da svaka zemlja članica do 2020. ostvari minimalni udio energije iz obnovljivih izvora u finalnoj potrošnji energije u transportu od 10% [3]. Republika Hrvatska je također izdala i Strategiju energetskog razvoja po uzoru na Europsku uniju (EU) u kojoj se između ostalog, obvezuje da će do 2020. ostvariti 20% proizvodnje iz obnovljivih izvora energije (OIE) u ukupnoj proizvodnji [4]. Promicanjem elektrifikacije transporta te proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora ide u prilog ostvarivanju zacrtanih ciljeva.

Sveprisutni naponi u cilju smanjenja emisija stakleničkih plinova rezultat su brojnih inicijativa i programa istraživanja i razvoja usmjerenih na postizanje čiste pretvorbe energije. Tehnologije koje zauzimaju najviše pažnje odnose se na uvođenje različitih vrsta električnih vozila (EV) u transportne sustave i korištenje OIE, kao što su energija vjetra i Sunca, u energetskim sustavima. Zbog intermitentne prirode obnovljivih izvora energije (OIE), odgovarajući energetski sustavi trebaju sadržavati značajnu rezervu u vidu konvencionalnih energetskih izvora ili značajan kapacitet postrojenja za skladištenje energije. To dovodi do povećanja cijene električne energije i cjelokupnog energetskog sustava te ograničava širu raspostranjenost OIE. Rastuća primjena električnih vozila donosi vrlo značajan kapacitet distribuiranih baterijskih akumulatora spojenih na mrežu, što otvara nove mogućnosti za integraciju OIE. Ove dvije tehnologije mogu imati koristi jedna od druge iz razloga što:

1. EV mogu osigurati spremnik golemog kapaciteta koji će brzo reagirati na potrebu pohrane vršnih opterećenja proizvedene električne energije iz intermitentnih OIE.

2. OIE su dokazani kao jeftin i čist način opskrbe EV električnom energijom koji na određenim lokacijama ima vrlo dobar potencijal i kako mu sam naziv kaže je obnovljiv. [5].

Istraživanja i razvoj u području naprednih EV i njihove integracije s mrežom provode se kroz dva sasvim nezavisna pristupa. Prvi pristup usmjeren je na optimizaciju pogona EV i njegov sustav kontrole [6], [7], i sve to se još dodatno proširuje pametnim punjenjem EV s ciljem smanjenja troškova električne energije ili varijacija napona na mreži [8]. Praćenjem voznih ciklusa i ciklusa punjenja EV može se dobiti utjecaj potrošnje električne energije, uslijed punjenja EV, na već postojeću krivulju potrošnje. Cilj je obraditi sustave kontrole punjenja EV koji neće utjecati na povećane troškove električne energije. Drugi pristup odnosi se na planiranje cjelokupnog energetskeg sustava čiji je cilj optimizirati komponente sustava za poznatu satnu distribucijsku krivulju potrošnje električne energije i proizvodnje električne energije koja uključuje proizvodnju iz OIE [9].

U planiranju energetskeg sustava promatra se odnos proizvodnje i potrošnje električne energije s ciljem da proizvodnja na najbolji mogući način zadovolji potrošnju električne energije. Ako je proizvodnja planirana iz OIE, kao što se to obrađuje u ovom radu, onda takvi sustavi postaju kompleksni za optimizaciju zbog intermitentnosti OIE. Potrošnja električne energije je predvidljiva, odnosno temelji se na navikama potrošača koje su u pravilu malo promjenjive, dok s druge strane proizvodnja iz OIE je nestalna i ovisi o vremenskim prilikama. Energije Sunca i vjetra ima u izobilju, ali ne i uvijek kada je to potrebno zbog čega dolazi do viška ili manjka proizvedene električne energije. Upravo iz tog razloga potrebno je višak proizvodnje pohraniti u obliku baterije, koje u ovom slučaju predstavljaju EV. EV mogu osim u potrošnji, djelovati i u proizvodnji električne energije. Naime, oni mogu predstavljati spremnike električne energije koji će se priključiti na mrežu energetskeg sustava i opskrbljivati je energijom u vrijeme manjka proizvodnje električne energije iz OIE [10].

U svrhu naprednog planiranja ovakvih sustava, razvijene su razne metode punjenja električnih vozila i planiranja cjelokupnog energetskeg sustava, a neke od njih bit će predstavljene u ovom radu. Cjelokupni energetske i transportni sustav u kombinaciji OIE s EV postaje veoma kompleksan i zahtjevan u svrhu optimizacije i zadovoljavanja potreba potrošnje i potražnje. Takvim sustavima se može optimalno upravljati samo uz široku primjenu informacijskih i komunikacijskih tehnologija (ICT).

Rad se neće baviti komunikacijskim tehnologijama potrebnim za ostvarivanje narednih sustava punjenja, to jest komunikacije između vozila i energetskog sustava, već će koristiti IT tehnologije.

Zadatak diplomskog rada je procijeniti utjecaj uvođenja EV u Dubrovačkoj regiji na satnu krivulju potrošnje električne energije i pronaći optimalne strategije punjenja EV sa svrhom maksimizacije integracije obnovljivih izvora energije te minimizacije troška punjenja vozila. Rad je rađen u sklopu i-RESEV projekta (ICT-aided integration of Electric Vehicles into the Energy Systems with a high share of Renewable Energy Sources) koji se bavi uvođenjem EV u energetski sustav s visokim udjelom OIE u proizvodnji električne energije kojim se upravlja uz široku primjenu ICT alata [11].

Za izradu diplomskog rada bilo je potrebno skupiti i obraditi podatke o proizvodnji i potrošnji na dubrovačkom području, kao i podatke o vozilima i voznim ciklusima. Podaci su prikupljeni za 2010. godinu, koja je predstavljala referentnu godinu na kojoj su se temeljili daljnji proračuni za buduće scenarije za 2020. 2030. i 2050. godinu. Zbog znatnog potencijala obnovljivih izvora, kao što su hidroenergija, energija vjetra i Sunčeva zračenja, proračuni su trebali biti izvršeni za šire područje Dubrovačke regije.

Za planiranje energetskog sustava s OIE i EV koristila su se već spomenuta dva pristupa. Prvi pristup temeljio se na podacima za referentni scenarij o broju vozila i voznim ciklusima, kao i predviđanjima o broju EV za buduće scenarije do 2050. i njihovim karakteristikama te su određeni ciklusi punjenja električnih vozila i njihov utjecaj na distribuciju satne krivulje potrošnje električne energije za sve zadane buduće scenarije. Proračun je rađen u Excelu. Drugi pristup uzima u obzir regulaciju EES koji obuhvaća potrošnju, proizvodnju iz OIE i EV kao i spremnik električne energije. Cilj je optimirati 100% obnovljivi energetski sustav i odrediti optimalne cikluse punjenja električnih vozila koji će regulirati zadovoljavanje potreba potrošnje iz planirane proizvodnje električne energije. Optimiranje EES-a proračunato je u programu EnergyPLAN za sve scenarije do 2050., u kojem su se vršili proračuni za razne cikluse punjenja EV i njihov utjecaj na regulaciju odnosa potrošnje i proizvodnje električne energije.

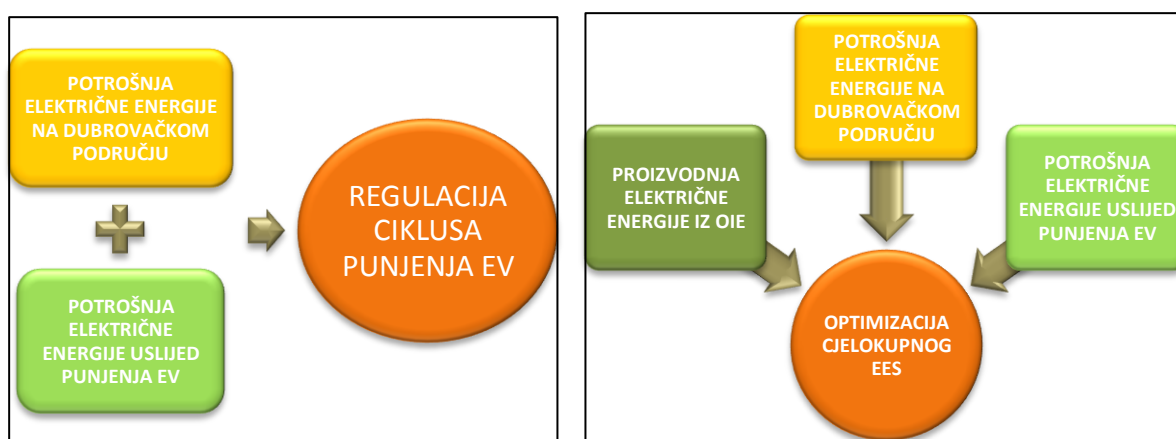
U radu je objašnjena metodologija i postupci proračuna i dat je prikaz rezultata za zadane scenarije za godine 2020., 2030. i 2050. za područje Dubrovnika s osvrtom i na Hrvatsku. Prikazani su rezultati više različitih ciklusa punjenja električnih vozila i njihov utjecaj na krivulju potrošnje, kao i uloga u regulaciji EES s visokom penetracijom OIE.



## 2. METODOLOGIJA

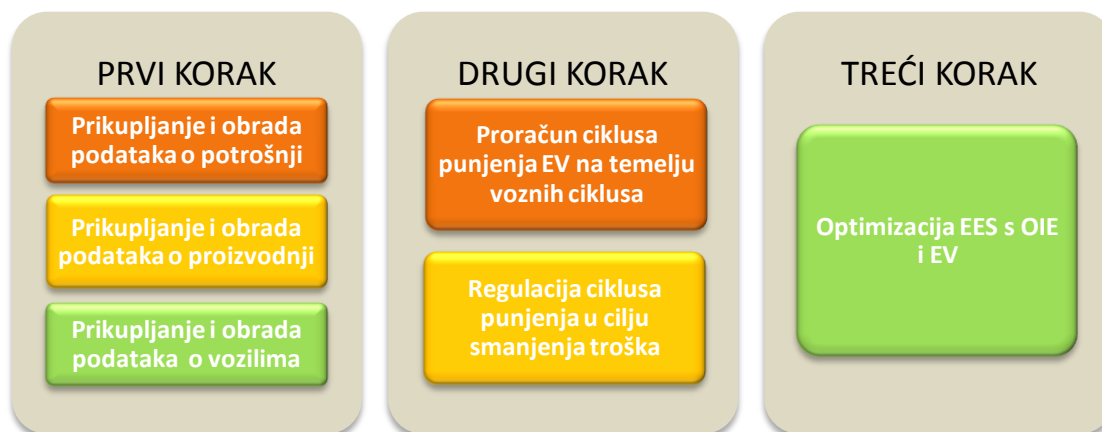
Koristeći visok potencijal u iskorištavanju energije iz obnovljivih izvora na dubrovačkom području, u radu se težilo ostvarenju optimizacije 100% obnovljivog EES. Sustav se temelji na proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora u kombinaciji s EV. Planiranje se proračunavalo za razdoblje do 2050. godine s izdvojenim scenarijima za 2020., 2030. i 2050. godinu. Prikupljeni podaci na kojima se temeljio proračun budućih scenarija uzeti su za 2010. godinu koja je ujedno predstavljala referentni scenarij. Za proračun je bilo potrebno prikupiti podatke o potrošnji i proizvodnji električne energije, kao i podatke o vozilima na dubrovačkom području.

Obrađena su dva pristupa radu. Prvi pristup obrađuje utjecaj penetracije EV na krivulju potrošnje električne energije i usmjeren je na optimizaciju pogona EV i njegov sustav kontrole s ciljem smanjenja troškova električne energije. Potrošnja uslijed punjenja EV utjecat će na povećanje ukupne potrošnje električne energije, stoga je potrebno odrediti cikluse punjenja EV koji će zadovoljiti minimalne troškove. Drugi pristup odnosi se na planiranje cjelokupnog energetskog sustava, čiji je cilj optimizirati komponente sustava za poznatu satnu distribucijsku krivulju potrošnje električne energije i proizvodnje električne energije koja uključuje proizvodnju iz OIE, s regulacijom ciklusa punjenja EV.



Slika 1. Prikaz odnosa komponenti prvog i drugog pristupa

Moglo bi se reći da je rad podijeljen u tri osnovna koraka. Prvi korak obuhvaća prikupljanje i obradu podataka o proizvodnji i potrošnji električne energije i vozilima. Drugi korak obrađuje prvi pristup, odnosno utjecaj penetracije EV na satnu krivulju potrošnje električne energije. Treći korak se odnosi na drugi pristup i obuhvaća regulaciju cjelokupnog EES.

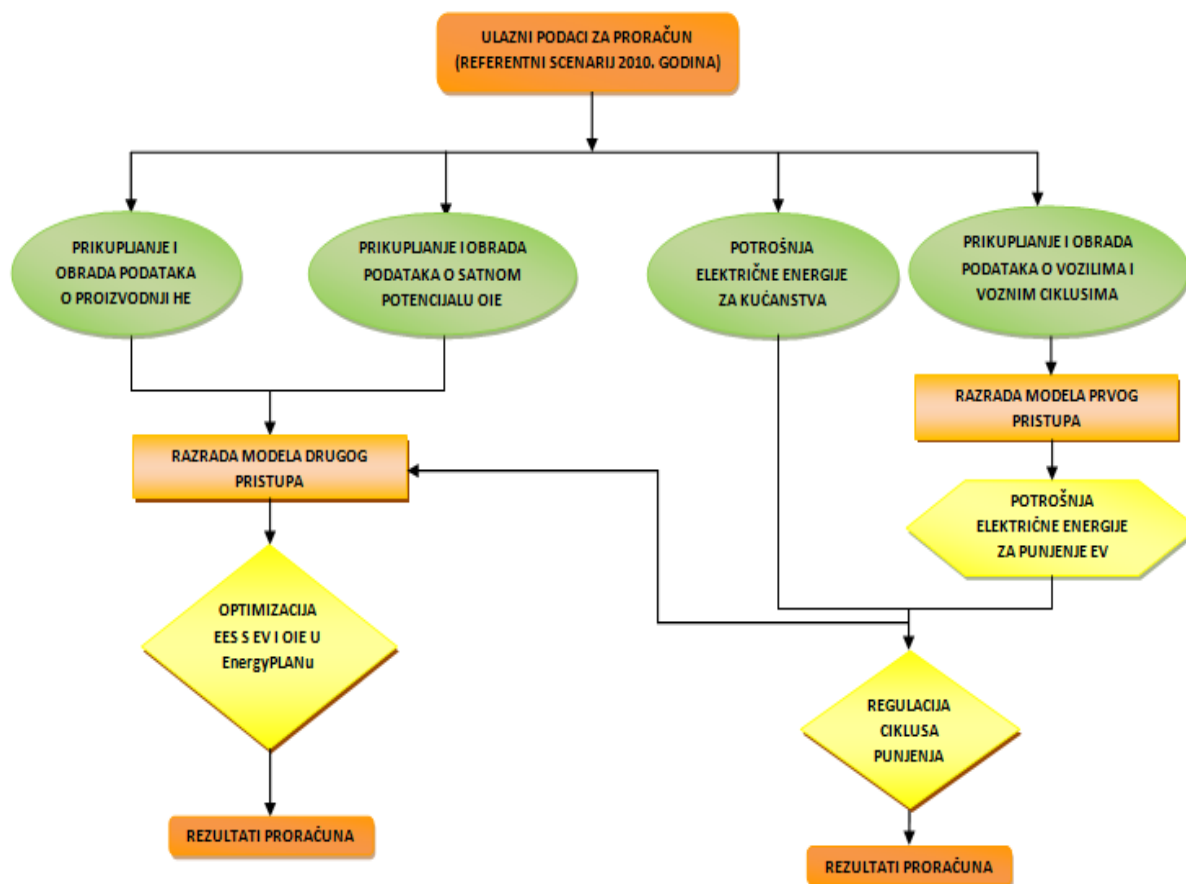


Slika 2. Tri osnovna koraka izvođenja rada

Za snabdijevanje električnom energijom, dubrovačko područje koristi već instalirani kapacitet HE Dubrovnik koja radi u sklopu elektroenergetskog sustava Hrvatske i u vlasništvu je Hrvatske elektroprivrede (HEP d.d.). Cilj rada je, uz poznatu potrošnju električne energije i proračune potrošnje do 2050., uz postojeće instalirane kapacitete proizvodnje energije, predvidjeti buduće kapacitete koji će zadovoljiti potrebe potrošnje. Dubrovačko područje ima znatan potencijal obnovljivih izvora i planira se izgradnja novih postrojenja za iskorištavanje hidroenergije, energije vjetra i Sunčeva zračenja, što je u radu uzeto u obzir prilikom planiranja proizvodnje za buduće scenarije.

Kako je već prije spomenuto, energetske sustavi koji potrebe za potrošnjom zadovoljavaju proizvodnjom električne energije iz OIE su nestabilni i teško ih se regulira zbog intermitentnosti OIE. Kontrola nad OIE, kao što su energija vjetra i energija Sunčeva zračenja, je ograničena i njihovu proizvodnju je teže predvidjeti za razliku od one proizvedene iz konvencionalnih izvora energije. Njihova proizvodnja predstavlja izazov za rad energetskog sustava. Proizvodnja iz energije vjetra obično je viša u satima niske potrošnje, a manja u vrijeme visoke potrošnje električne energije, što ne odgovara potrebama za zadovoljavanje potrošnje električne energije [12]. Proizvodnje iz energije Sunčeva zračenja ima tijekom dana, ali se ne poklapa u potpunosti s potrebama potrošnje koju je potrebno zadovoljiti iz proizvodnje [12]. Proizvodnja ovisi o vremenskim uvjetima i nerijetko se javlja višak ili manjak proizvodnje, pa je iz tog razloga potrebno osigurati spremnike električne energije. Ulogu spremnika energije imat će baterije EV, koje će služiti kao pohrana proizvedenog viška električne energije, a isto tako mogu služiti u proizvodnji i zadovoljavati potrebe mreže za električnom energijom u vrijeme manjka proizvodnje energije, takozvana vozila-na-mreži (V2G).

Na dijagramu toka [Slika 3.] prikazan je tijek postupaka koji su obrađivani u radu.



Slika 3. Dijagram toka postupka

Dijagram toka obuhvaća i povezuje komponente procesa koje su obrađivane u radu. Prvo je bilo potrebno prikupiti osnovne podatke o proizvodnji, potrošnji i vozilima na dubrovačkom području i zatim ih proračunati za buduće scenarije do 2050.. Proračun se izvodio prema dva razrađena modela za dva pristupa. U modelu prvog pristupa razrađene su metode dobivanja satne krivulje potrošnje električne energije za punjenje EV na temelju voznih ciklusa. S obzirom na dobivenu krivulju i satnu krivulju potrošnje električne energije za Dubrovačku regiju, prikazao se utjecaj penetracije EV na krivulju potrošnje električne energije. Proračunat je i model regulacije punjenja EV u cilju smanjenja troška. U daljnjem tekstu prikazani su rezultati za sve scenarije do 2050.

Model drugog pristupa obuhvaća optimizaciju EES u EnergyPLAN-u, koji uključuje regulaciju planirane proizvodnje, proračunate potrošnje i kombinacije ciklusa punjenja EV za sve scenarije do 2050.. Cilj je odrediti cikluse punjenja EV koji će imati najpovoljniji utjecaj na planirani EES u svrhu zadovoljenja potrošnje iz planirane proizvodnje iz OIE.

## 2.1. Metodologija prvog pristupa

Kako bi se dobio utjecaj EV na satnu krivulju potrošnje, potrebno je bilo prvo dobiti satne vrijednosti potrošnje električne energije za punjenje EV. Problemu se pristupilo na način da su se prvo odredili dnevni vozni ciklusi na temelju kojih se dobio podatak o broju EV na raspolaganju za punjenje. Odabran je jedan radni dan i dan vikenda i proračun se radio za 24 sata. Za poznati broj vozila proračunata je potrošnja električne energije. Razrada modela podijeljena je u dva osnovna koraka [Slika 4].

### PRVI KORAK



### DRUGI KORAK



Slika 4. Tijek dva osnovna koraka prvog pristupa

U prvom koraku odabrane su vrste EV s podacima o kapacitetu baterije i udaljenosti koju mogu prijeći s punom baterijom. Na temelju prosječne dnevne udaljenosti koju vozilo prijeđe na području Dubrovnika, odredio se broj punjenja u danu i dobio se broj vozila koji su na raspolaganju za punjenje. S obzirom na poznati kapacitet svih vrsta baterije i broj vozila na raspolaganju za punjenje, dobila se dnevna potrošnja električne energije za punjenje EV.

U drugom koraku uslijedila je analiza na temelju podataka o krivulji opterećenja prometa na dubrovačkom području. Poznavajući krivulju opterećenja prometa lako se odredila krivulja prometa u mirovanju. U razdoblju vršnih opterećenja u prometu najmanji je broj vozila u mirovanju i obratno. S obzirom na prethodno izračunatu dnevnu potrošnju električne energije i poznatu krivulju prometa u mirovanju dobila se distribucija dnevne krivulje potrošnje električne energije za punjenje EV za 24 sata. Dnevnom distribucijom dobila se i godišnja distribucija potrošnje električne energije za punjenje EV i analizirao se njen utjecaj na satnu krivulju potrošnje električne energije na dubrovačkom području kao i model regulacije punjenja za zadovoljavanje minimalnog troška. Model prvog pristupa primijenjen je na 2020., 2030. i 2050. godinu.

## 2.2. Metodologija drugog pristupa

U drugom pristupu analizirao se EES koji obuhvaća proizvodnju iz OIE koja zadovoljava potrebe potrošnje. U program EnergyPLAN su se unijele satne krivulje proizvodnje iz OIE, potrošnje električne energije i potrošnje za punjenje EV prethodno dobivene u prvom pristupu. Proračun je rađen za sve buduće scenarije. U radu su razmatrana četiri modela punjenja EV:

1. Neregulirano punjenje (*dump charge*)
2. Fleksibilna regulacija potrošnje za punjenje EV
3. Pametno punjenje (*smart charge*)
4. Pametno punjenje s uključenim V2G, koje osim regulacije punjenja uključuje i regulaciju pražnjenja baterije koje služi kao dodatna energija za opskrbu mreže.

Neregulirano punjenje vozila je model koji se temelji na navikama i potrebama vozača. Vozila se pune u vremenu kada su parkirana, ovisno o zahtjevima potrošača, što će detaljnije biti opisano u prvom pristupu u daljnjem tekstu. Fleksibilna raspodjela potrošnje uslijed punjenja EV osigurava da se vozila pune za vrijeme niske potrošnje u mreži (noćni sati) i da se u isto vrijeme zadovolji smanjenje vršnih opterećenja uslijed visoke proizvodnje električne energije iz OIE, koju koristi za punjenje EV. Pametno punjenje osigurava da je baterija svakog pojedinačnog vozila prije isključivanja napunjena do kraja. Općenito, baterija je puna u slučaju viška proizvodnje električne energije. Međutim, kada nema viška proizvodnje energije, model mora osigurati da je baterija napunjena prije voznog ciklusa. Pametnim punjenjem s uključenim V2G u sustavu proizvodnje omogućuje punjenje V2G vozila u vrijeme dostupnog "viška proizvodnje električne energije" (CEEP) i raspoloživog kapaciteta baterije unutar granica opterećenja priključka na mrežu. V2G vozila, uz punjenje, opskrbljuju mrežu u slučaju moguće zamjene proizvodnje i kao raspoloživa energija u baterijama koja se pohranjuje nakon zadovoljenja potrošnje energije u transportu i služi za snabdijevanje mreže uslijed manjka proizvodnje.

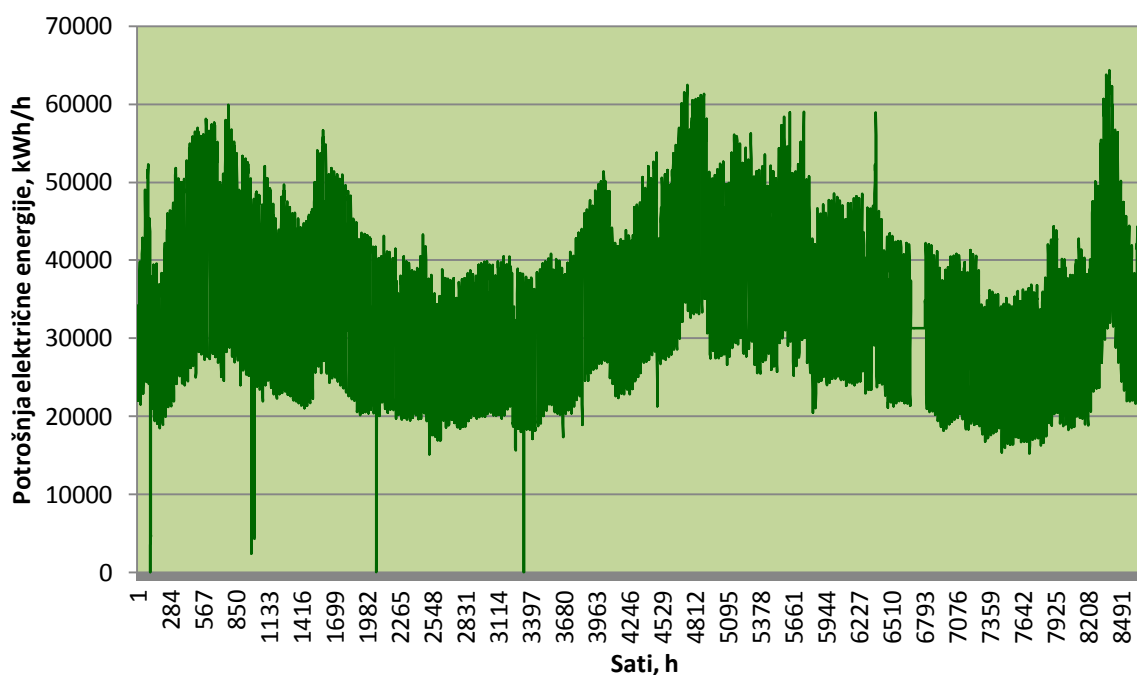
Opisani modeli punjenja bit će analizirani u radu s prikazanim rezultatima svakog od modela. Prilikom analize modela razmatrao se njihov utjecaj na satnu krivulju potrošnje električne energije, kao i utjecaj na proizvodnju iz OIE. Na temelju analiza i ostalih čimbenika pretpostavljeni su modeli punjenja za svaki scenarij do 2050. i na temelju dobivenih rezultata date su usporedbe i zaključci.

### 3. PRIKUPLJANJE I OBRADA PODATAKA

Za izradu proračuna utjecaja elektrifikacije transporta na krivulju potrošnje električne energije bilo je potrebno prikupiti podatke o potrošnji električne energije i podatke o vozilima na dubrovačkom području za određenu godinu. HEP d.d. opskrbljuje Dubrovnik električnom energijom, odnosno HE Dubrovnik koja je pod upravom HEP-a i priključena je na mrežu EES-a Hrvatske. Stoga je bilo potrebno prikupiti podatke o proizvodnji električne energije koja je zadovoljavala potrošnju. Dubrovnik ima znatan potencijal obnovljivih izvora pa uz hidroenergiju su energija vjetra i energija Sunčeva zračenja. Cilj rada je maksimizacija integracije obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije pa je bilo potrebno skupiti i podatke o energiji vjetra i energiji Sunčeva zračenja. Kao godina referentnog scenarija uzeta je 2010. godina i svi podaci koje je bilo potrebno prikupiti za izradu proračuna uzeti su za tu godinu.

#### 3.1. Prikupljanje i obrada podataka o potrošnji električne energije

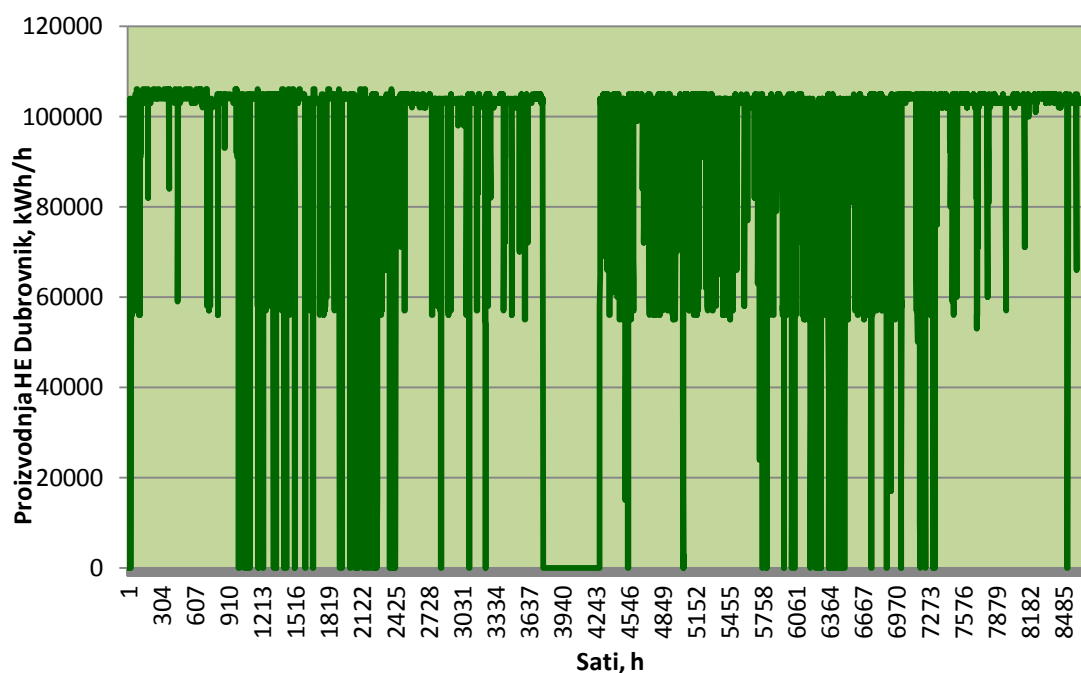
Podaci o potrošnji električne energije uzeti su za šire dubrovačko područje. Elektrojug Dubrovnik ustupio je podatke o potrošnji električne energije mjerene na trafostanici Komolac 110/35kV za 2010. godinu. Trafostanica Komolac napaja područje od Prevlake na jugoistoku do Slanoga na sjeverozapadu Dubrovnika. To uključuje trafostanice 35/10 kV Lapad, Šipčine, Komolac, Slano, Orašac, Mlini, Cavtat, Pločice. Mjerenja potrošnje električne energije na trafostanici Komolac zabilježena su za svakih 15 minuta za referentnu godinu. Kao ulazni podatak za proračun, bilo je potrebno dobiti godišnju krivulju potrošnje električne energije sa prosječnim satnim vrijednostima. Mjerenja s trafostanice Komolac svela su se na prosječne satne vrijednosti i dobila se krivulja potrošnje sa satnim vrijednostima za referentnu godinu. Iz dijagrama na [Slika 5] se vidi da je izraženo povećanje potrošnje u zimskom periodu radi grijanja, jer se za potrebe grijanja na području Dubrovnika koristi električna energija, kao i u ljetnom periodu zbog turizam. Maksimalno opterećenje u jednom satu u 2010. iznosilo je 64400 kWh/h.



Slika 5. Krivulja prosječnih satnih vrijednosti potrošnje električne energije za šire dubrovačko područje, 2010. godina

### 3.2. Prikupljanje i obrada podataka o proizvodnji iz HE Dubrovnik

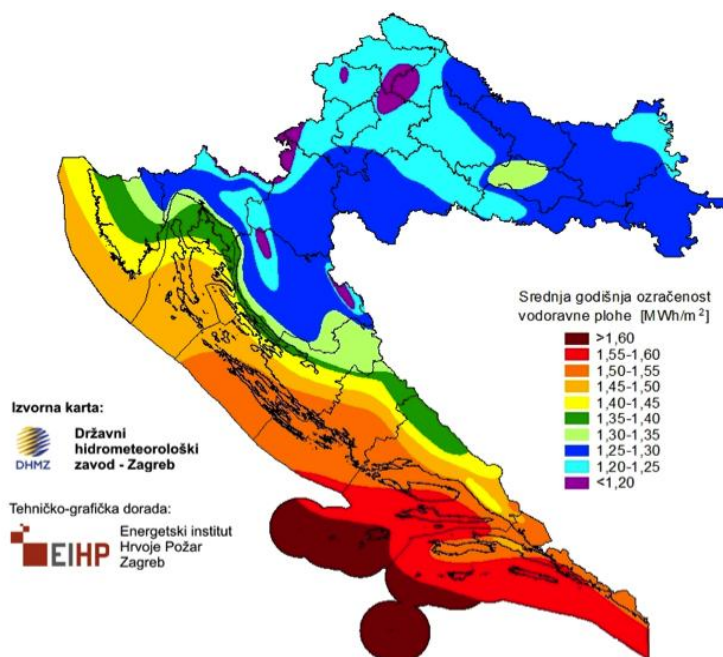
HE Dubrovnik nalazi se u Platu i u vlasništvu je HEP-a. Hidroelektrane sliva rijeke Trebišnjice nalaze se u dvije države: u Republici Hrvatskoj i u Bosni i Hercegovini, a HE Dubrovnik je posljednja stepenica tog hidroenergetskog sustava. HE Dubrovnik koristi vodu rijeke Trebišnjice iz akumulacijskog jezera Bileća, nastalo izgradnjom brane Grančarevo. Zahvat vode za HE Dubrovnik ostvaren je izgradnjom brane Gorica koja stvara kompenzacijski bazen. Brana Gorica nalazi se nizvodno od HE Trebinje, tako da je donja voda HE Trebinje i gornja voda HE Dubrovnik. HE Dubrovnik ima dva agregata od kojih svaki ima instaliranu snagu od 108 MW, što je ukupno 216 MW instalirane snage. Proizvodnja s agregata I, dalekovodom I snabdijeva područje Hrvatske, a proizvodnja s agregata II, dalekovodom II snabdijeva susjednu državu Bosnu i Hercegovinu [13]. HE Dubrovnik ustupila je mjerne podatke o proizvodnji električne energije za 2010. godinu. Podaci su mjereni za svaki sat u godini i dobila se krivulja godišnje proizvodnje električne energije za svaki pojedini sat. Iz dijagrama na [Slika 6] može se zaključiti da je HE Dubrovnik veći dio godine u funkciji i većinom radi pri maksimalnom opterećenju, osim mjeseca lipnja koji je predviđen za remont.



Slika 6. Satne vrijednosti proizvodnje HE Dubrovnik za 2010. godinu

### 3.3. Prikupljanje i obrada podataka o energiji Sunčeva zračenja

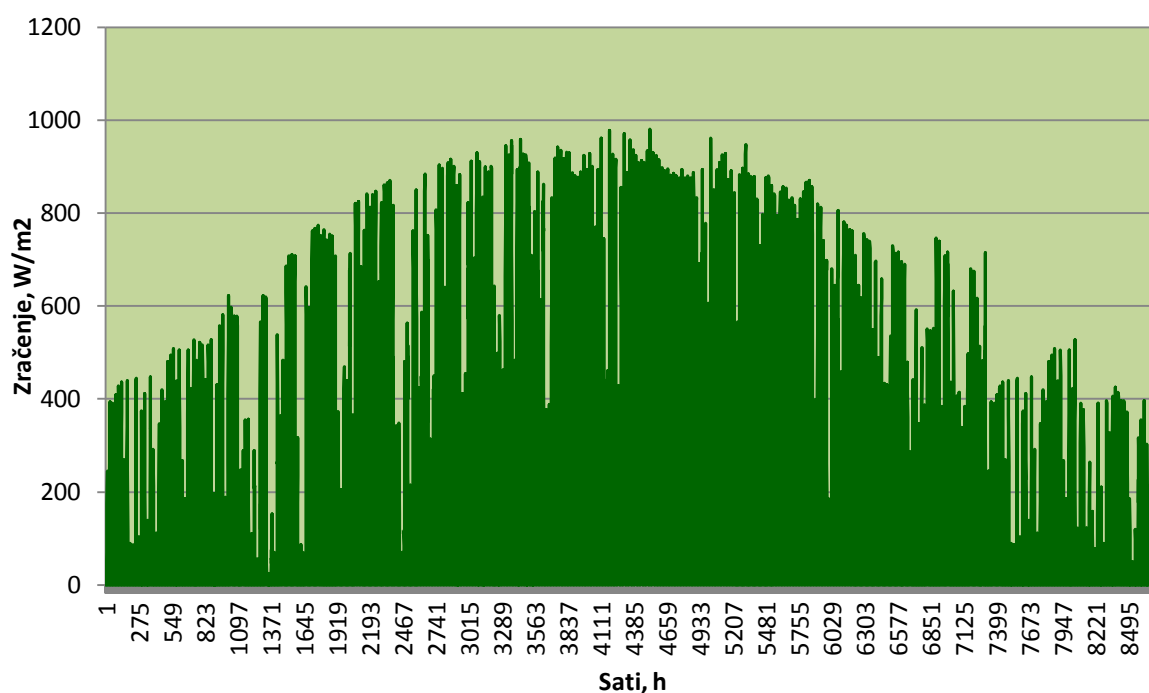
Dubrovnik ima značajan potencijal u iskorištavanju Sunčeve energije za proizvodnju električne energije. Broj sunčanih sati u godini za Dubrovnik iznosi 2623 sata i spada među najozračenija područja na teritoriju Republike Hrvatske.



Slika 7. Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem na području Republike Hrvatske



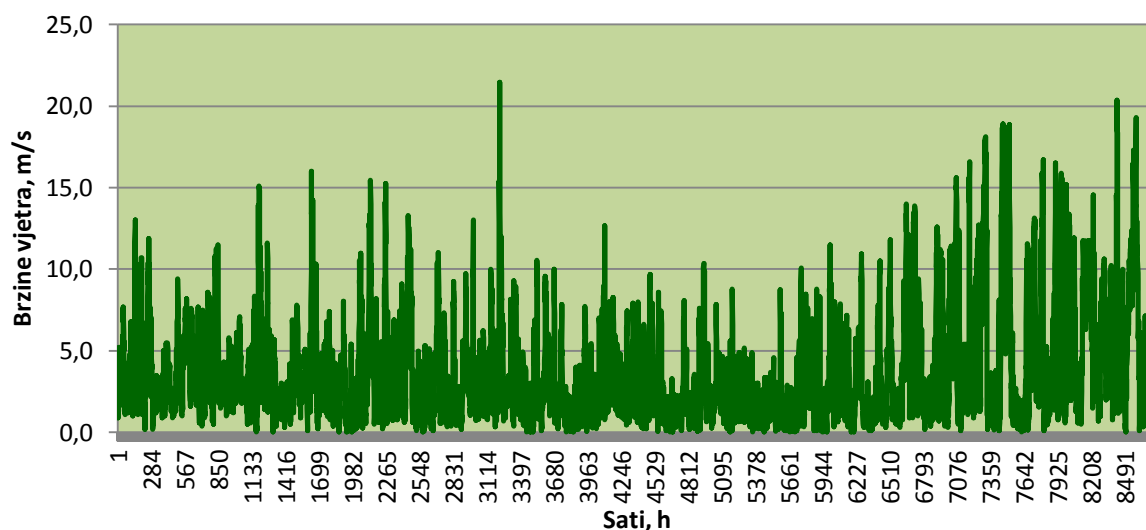
Podatke o energiji Sunčeva zračenja ustupio je Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ). Zračenje Sunca na području Dubrovnika mjereno je svakih 10 minuta kroz 2010. godinu i bilo je potrebno te mjerne podatke svesti na prosječne satne vrijednosti. Mjerni podaci za 2010. godinu nisu bili potpuni jer su nedostajala mjerenja za mjesece siječanj, listopad, studeni i prosinac te je stoga bilo potrebno nedostajeće podatke zamjeniti vrijednostima izmjerenima u prethodnim godinama. Mjeseci koji su nedostajali uzeti su iz mjerenja u 2003. i 2004. godini kako bi se dobila kompletna krivulja godišnjeg zračenja za područje Dubrovnika za svaki sat u godini.



Slika 8. Krivulja prosječnih satnih vrijednosti dozračene energije Sunca globalnog zračenja na ravnu plohu na području Dubrovnika za 2010. godinu

### 3.4. Prikupljanje i obrada podataka o energiji vjetra

Podatke o vjetru ustupio je DHMZ za 2010. godinu. Podaci o brzini vjetra mjereni su za svakih 10 minuta kroz godinu. Vrijednosti brzina vjetra trebalo je svesti na prosječne satne vrijednosti kako bi se dobila godišnja krivulja sa satnim vrijednostima brzina za 2010. godinu. Među podacima je nedostajao mjesec siječanj pa su se uzele vrijednosti brzina vjetra iz 2002. i 2003. godine kako bi se dobila kompletna krivulja.

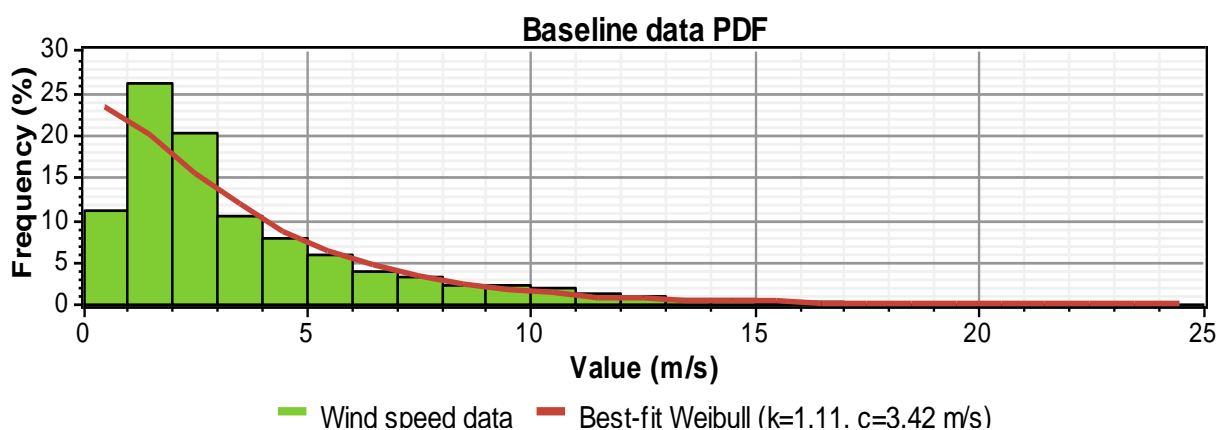


Slika 9. Prosječne satne vrijednosti brzina vjetra na području Dubrovnika, 2010. godina

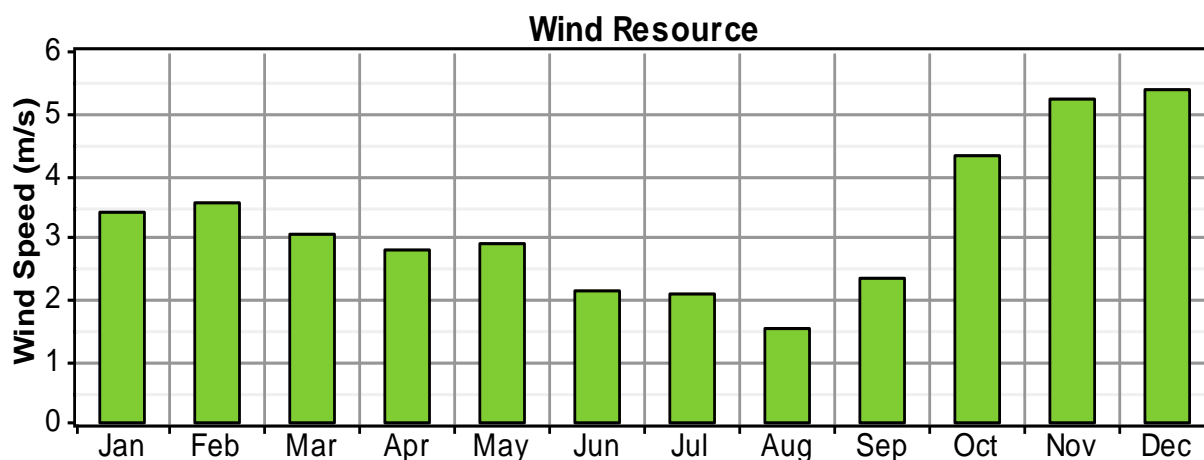
Godišnja krivulja brzina vjetra sa satnim vrijednostima korištena je za proračun u programu HOMER pomoću kojeg je dobivena proizvodnja iz vjetroelektrana za instaliranu snagu od 6 MW. Proizvodnja se računala za odabrane tri vrste vjetroturbina [Tablica 1], s prosječnim faktorom angažirane snage 28,03% za sve tipove. U HOMER su se unijeli podaci o prosječnim satnim brzinama vjetra za 2010. i podaci o vjetroturbinama, na temelju kojih se dobila ukupna proizvodnja iz vjetroturbina [14].

Tablica 1. Vrste vjetroturbina i njihove karakteristike

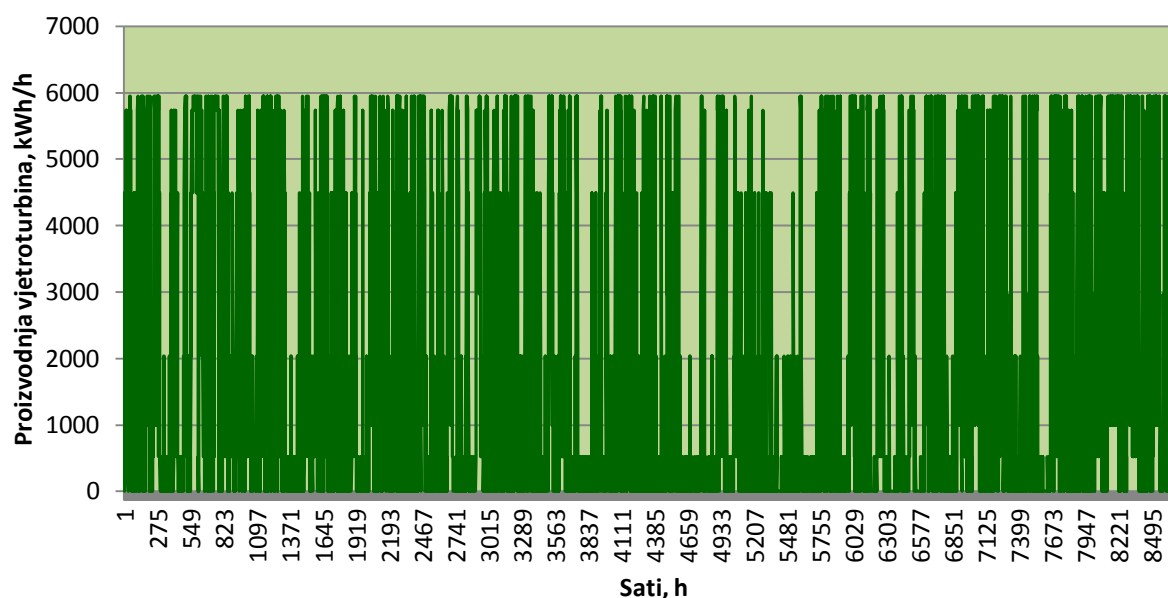
| Vjetroturbina | Instalirana snaga (MW) | Visina stupa (m) |
|---------------|------------------------|------------------|
| Končar        | 1                      | 60               |
| Vestas        | 2                      | 80               |
| Vestas        | 3                      | 80               |



Slika 10. Weibull-ova krivulja raspodjele brzina vjetra



Slika 11. Prosječne brzine vjetra za mjesec u 2010. godini



Slika 12. Godišnja proizvodnja vjetroturbina za instaliranu snagu od 6 MW

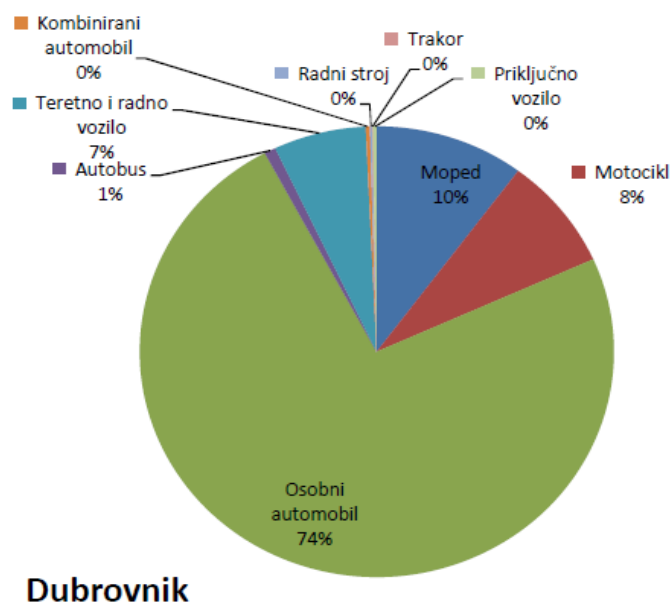
Dijagram na [Slika 12] prikazuje proračunatu godišnju proizvodnju vjetroturbina za lokacije na kojima su se mjerile brzine vjetra, ali bi se njih trebalo detaljnije analizirati zbog nedostatka prikupljenih podataka. Također je važno naglasiti da bi za više lokacija godišnja krivulja proizvodnje imala drugačiji oblik.

### 3.5. Prikupljanje i obrada podataka o vozilima

U cilju provođenja elektrifikacije transporta potrebno je bilo pribaviti podatke o broju vozila na dubrovačkom području. U radu se elektrifikacija transporta odnosi samo na osobne

automobile. Korišteni su podaci o broju osobnih automobila dobiveni iz Ministarstva unutarnjih poslova (MUP), Policijska uprava dubrovačko-neretvanska.

U 2010. godini sveukupno je registrirano 22 927 vozila, što obuhvaća područje od Brsečina do Župe dubrovačke, od čega 16 617 osobnih automobila, dok ostali dio otpada na motocikle, mopede i druga vozila. U Prometnoj studiji grada Dubrovnika također postoje podaci o broju vozila koji su preuzeti iz MUP-a, gdje se navodi veći broj automobila, ali taj podatak u radu nije uzet u obzir jer se on odnosi na cijelu Dubrovačko-neretvansku županiju, a u radu se promatra uže područje grada i bliže okolice [15].



Slika 13. Struktura registriranih motornih vozila u Dubrovniku [15]

Na temelju podataka o broju vozila za 2010. godinu radio se proračun za buduće scenarije i dobiven je broj automobila za 2020., 2030. i 2050. godinu. Za buduće scenarije se smatra da će se trenutna vozila na tekuća goriva zamijeniti EV. Stoga je bilo potrebno proračunati penetraciju EV na dubrovačkom području do 2050. Broj vozila temeljio se na već postojećoj studiji koja je provedena za Hrvatsku [16]. Za proračun potrošnje električne energije uslijed punjenja vozila, trebalo je preispitati vozne cikluse i odrediti karakteristike baterije EV kako bi se dobili ciklusi punjenja, na temelju kojih bi bila poznata potrošnja električne energije za punjenje EV. Ti podaci i razrada proračuna bit će objašnjeni u daljnjem tekstu.

#### **4. IZRADA PRORAČUNA UTJECAJA PENETRACIJE EV NA SATNU KRIVULJU POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Na temelju poznatih podataka izrađen je proračun utjecaja elektrifikacije transporta na krivulju potrošnje električne energije na dubrovačkom području. Kao referentni scenarij uzeti su podaci iz 2010. godine, na temelju kojih su dobiveni scenariji za 2020., 2030. i 2050. godinu. Proračun je rađen u Excelu gdje su se na temelju referentnog scenarija dobili podaci o broju EV i potrošnji električne energije do 2050. godine.

S obzirom da će se do 2050. povećavati penetracija EV na području Dubrovnika, uključivanje većeg broja EV uzrokovat će porast ukupne predviđene potrošnje električne energije. Ako bi se sustav promatrao u cjelini, s kompletnom distribucijskom mrežom HEP-a, postojali bi rezervni kapaciteti koji bi osigurali pokrivanje vršnih opterećenja. Međutim, ako se sustav promatra na lokalnoj razini, to onda ne mora biti slučaj [17]. Od ukupnog broja EV, teoretski je 90% njih na raspolaganju za punjenje u bilo koje doba, a s povećanim brojem EV povećava se i potrošnja električne energije [18], [19]. Ako bi se promatrali ciklusi punjenja EV na temelju promatranih ciklusa vožnje i ako bi se udovoljavalo potrebama i navikama ljudi, takvi ciklusi punjenja će vrlo vjerojatno utjecati na povećanje vršne potrošnje kao i na povećani trošak, kako je to i prikazano u ovom radu. Da bi se izbjegao taj problem potrebno je kontrolirati punjenje EV u cilju smanjenja vršnih opterećenja uzrokovanih punjenjem EV [20].

Potrebno je bilo prikupiti podatke o voznim ciklusima na području Dubrovnika i okolice, kako bi se statistički znalo koja su vozila na raspolaganju za punjenje. U ovom radu je pokazano da neregulirano punjenje uzrokuje probleme na lokalnoj distribucijskoj mreži, stoga su se ispitali regulirani ciklusi punjenja EV [21]. Uzete su u obzir različite vrste električnih vozila i načina punjenja. Promatrani su dnevni vozni ciklusi za jedan specifičan radni dan i dan vikenda, na temelju kojih su se odredili ciklusi punjenja električnih vozila i njihov utjecaj na krivulju potrošnje. Pretpostavka je da se u većini tjedana ne mijenja raspored voznih ciklusa tijekom godine pa se proračun radnog dana i dana vikenda primijenio na cijelu godinu [22].

#### 4.1. Potrošnja električne energije do 2050. godine

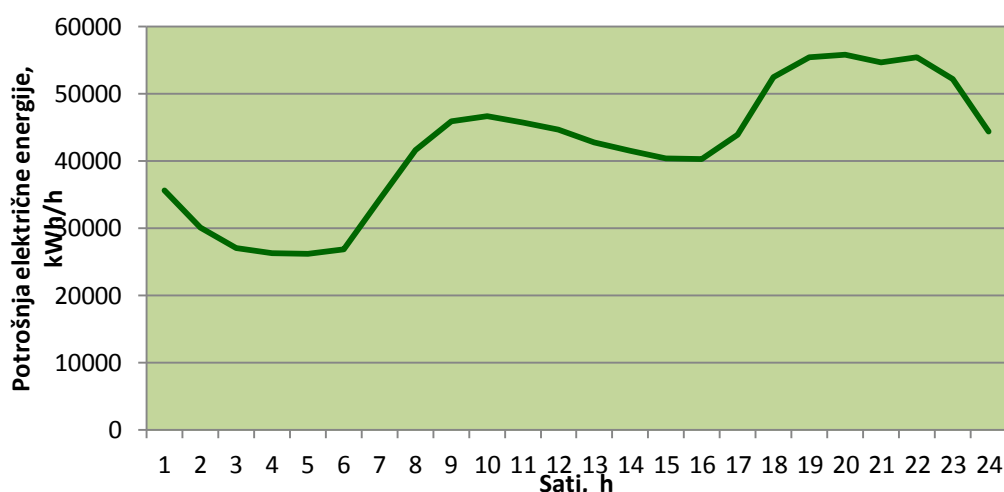
Na temelju referentnog scenarija i poznatih podataka o potrošnji električne energije za Hrvatsku do 2050. godine izračunata je potrošnja električne energije za Dubrovačku regiju do 2050. godine. Ovakva gruba procjena potrošnje električne energije je uzeta zbog jednostavnosti proračuna, jer se rad nije bavio detaljnom analizom potreba potrošnje svakog sektora na temelju kojih bi se razvili vjerodostojniji podaci za proračun budućih scenarija. Za lokalnu procjenu treba ipak detaljnije razraditi potrebe svakog sektora za električnom energijom kao i moguće uštede, utjecaje raznih politika i strategija.

Podaci o potrošnji električne energije za Hrvatsku preuzeti su iz studije koja je obrađena za Hrvatsku [16]. Uzevši u obzir postotak povećanja potrošnje električne energije od 2010. do 2050. godine za Hrvatsku i poznati podatak o potrošnji električne energije za Dubrovnik iz 2010. godine, izračunate su vrijednosti potrošnje električne energije za Dubrovnik za 2020., 2030. i 2050. godinu.

Tablica 2. Potrošnja električne energije za Hrvatsku i Dubrovnik do 2050. godine

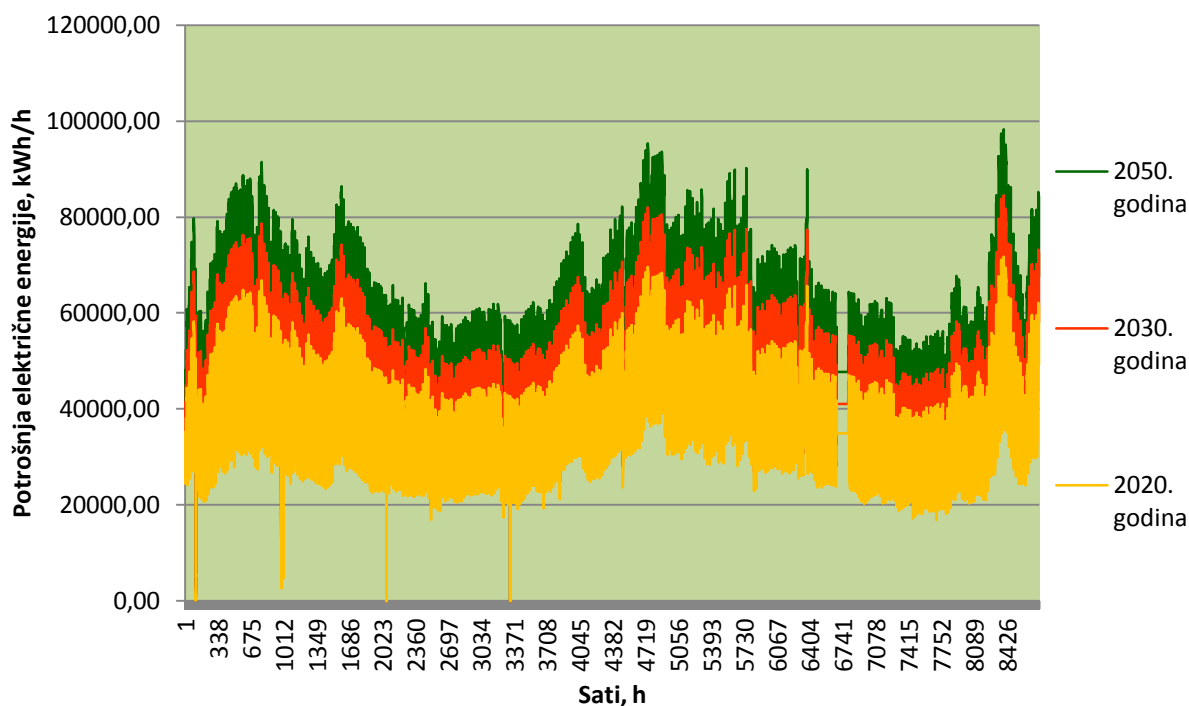
| GODINA  | 2010. | 2020. | 2030. | 2050. |
|---|-------|-------|-------|-------|
| POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE U HRVATSKOJ (TWh/god.)  | 16,33 | 18,19 | 21,43 | 24,93 |
| POSTOTAK POVEĆANJA POTROŠNJE (%)                      | 11,41 | 17,79 |       | 16,33 |
| POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DUBROVNIKU (TWh/god.) | 0,311 | 0,346 | 0,408 | 0,474 |

Radi jednostavnosti proračuna u obzir je uzeto da će krivulja potrošnje električne energije za scenarije do 2050. pratiti jednaki trend koji se temelji na baznoj 2010. godini, jer se pretpostavlja da će navike ljudi ostati slične.



Slika 14. Potrošnja električne energije za područje Dubrovnika za specifičan radni dan u tjednu u 2010. godini

Dijagram [Slika 14.] prikazuje satnu krivulju potrošnje električne energije za Dubrovnik za jedan specifičan radni dan u tjednu u 2010. godini. Iz dijagrama se vidi da je povećana potrošnja energije tijekom dana, u jutarnjim, te kasnijim popodnevnom i večernjim satima te prati navike ljudi. Pretpostavka je da će se potrošnja električne energije povećavati do 2050. godine zbog povećanja stanovništva i povećanja potreba za električnom energijom. Na temelju izračunatih vrijednosti i određenih pretpostavki dobivene su satne krivulje potrošnje za 2020., 2030. i 2050. godinu.



Slika 15. Satne krivulje potrošnje električne energije za 2020., 2030. i 2050. godinu

## 4.2. Penetracija električnih vozila do 2050. godine

U cilju smanjenja ispuštanja stakleničkih plinova u atmosferu, do 2050. godine vjerojatno će doći do velikog broja EV koja će skoro u potpunosti zamijeniti vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem. Naime, energetska učinkovitost motora s unutarnjim izgaranjem je u prosjeku oko 12,6% (učinkovitost odnosa goriva na ulazu i goriva na izlazu, na kotačima vozila), dok energetska učinkovitost EV doseže gotovo 70% (omjer prijenosa električne energije od mreže na kotače vozila) [23]. Isto tako za prosječnu vožnju od 50 km/danu vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem potroše 40 kWh/danu, dok EV za istu vožnju potroše 10 kWh/danu [24].

Za proračun broja električnih vozila u Dubrovniku korišteni su podaci o broju vozila u Hrvatskoj [16]. Na temelju broja osobnih vozila u 2010. godini u Hrvatskoj i u Dubrovniku dobiven je udio osobnih vozila u Dubrovniku u ukupnom broju osobnih vozila u Hrvatskoj.

Tablica 3. Broj osobnih vozila u Hrvatskoj i Dubrovniku u 2010. godini

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Godina</b>  | <b>2010.</b> |
| <b>Broj osobnih vozila u Hrvatskoj</b>   | 1220302      |
| <b>Broj osobnih vozila u Dubrovniku</b>  | 16617        |
| <b>Postotak osobnih vozila u Dubrovniku u ukupnom broju osobnih vozila u Hrvatskoj (%)</b> | 1,362        |

S obzirom da je poznat broj električnih vozila za Hrvatsku za svaki pojedini scenarij [16], prema postotku udjela osobnih vozila u Dubrovniku u ukupnom broju vozila u Hrvatskoj dobio se broj električnih vozila u Dubrovniku za svaki pojedini scenarij, [Tablica 4].

Tablica 4. Broj električnih vozila u Hrvatskoj i Dubrovniku za svaki od budućih scenarija

| SCENARIJ                    | 2010. GODINA | 2020. GODINA | 2030. GODINA | 2050. GODINA |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>BROJ EV U HRVATSKOJ</b>  | 0            | 10723        | 581802       | 1368462      |
| <b>BROJ EV U DUBROVNIKU</b> | 0            | 146          | 7922         | 18635        |

Jednako kao i za pretpostavke potrošnje električne energije, procjena penetracije EV u Dubrovačkoj regiji se temeljila na grubim pretpostavkama. Za lokalnu procjenu broja vozila bit će potrebno analizirati i uzeti u obzir vanjske faktore koji će utjecati na određivanje broja vozila do 2050..



#### 4.2.1. Vozni ciklusi i ciklusi punjenja EV

Kako bi se dobila satna krivulja potrošnje električne energije za punjenje EV i njen utjecaj na satnu krivulju potrošnje za ostale potrebe na dubrovačkom području, potrebno je bilo ispitati vozne cikluse za to područje i na temelju njih dobiti cikluse punjenja EV kako bi se odredila potrošnja električne energije za punjenje EV.

EV mogu biti izazov za energetske sustave iz razloga što će potrošnja uslijed punjenja izazvati veliku fleksibilnost opterećenja, jer su vozila u stanju mirovanja 95% svog životnog vijeka, što je pozitivno s gledišta napajanja jer se mogu lako puniti kod kuće, na poslu ili na parkiralištima, što upućuje na to da vrijeme punjenja može lako varirati [25]. Postoje mnoge mogućnosti za dobivanje profila punjenja vozila. Neke se vrlo vjerojatno mogu ostvariti ali upitna je njihova sigurnost jer ovise o potrebama punjenja vozila i voznim ciklusima koji zadovoljavaju potrebe vozača [26]. U ovom radu je prikazan postupak dobivanja krivulje potrošnje električne energije za punjenja vozila koji se temelji na pretpostavljenim voznim ciklusima baziranim na potrebama vozača i opterećenja prometa. Karakteristike odabranih EV su uzete u obzir.

##### 4.2.1.1. Punjenje EV na temelju pretpostavljenih voznih ciklusa

Osnovni podatak na kojem se temeljio proračun je vrsta EV koje će se primjenjivati. Jedan od glavnih nedostataka EV je kilometraža koju mogu prijeći s punom baterijom. Ta udaljenost danas doseže svega 150 km, zbog čega ih je pogodnije koristiti u urbanim središtima. Analizom karakteristika više vrsta EV navedenih u literaturi, odredile su se tri osnovne kategorije vozila [Tablica 5] čija se podjela temeljila na kapacitetu baterije i udaljenosti koju mogu prijeći do ponovnog punjenja. S obzirom da su odabrane tri vrste električnih vozila s različitim kapacitetima baterija, pretpostavljeno je da je svaka vrsta u jednakom broju zastupljena u ukupnom broju električnih vozila u Dubrovniku [27].

Tablica 5. Odabrane vrste električnih vozila i njihove karakteristike

| Vrste vozila | Kapacitet baterije (kWh) | Put (km) | Potrošnja (kWh/100km) | Snaga iz mreže za punjenje (kW) |
|--------------|--------------------------|----------|-----------------------|---------------------------------|
| MALI         | 10                       | 100      | 10                    | 2,2                             |
| SREDNJI      | 20                       | 130      | 15,38                 | 4,4                             |
| VELIKI       | 35                       | 180      | 19,44                 | 7,8                             |

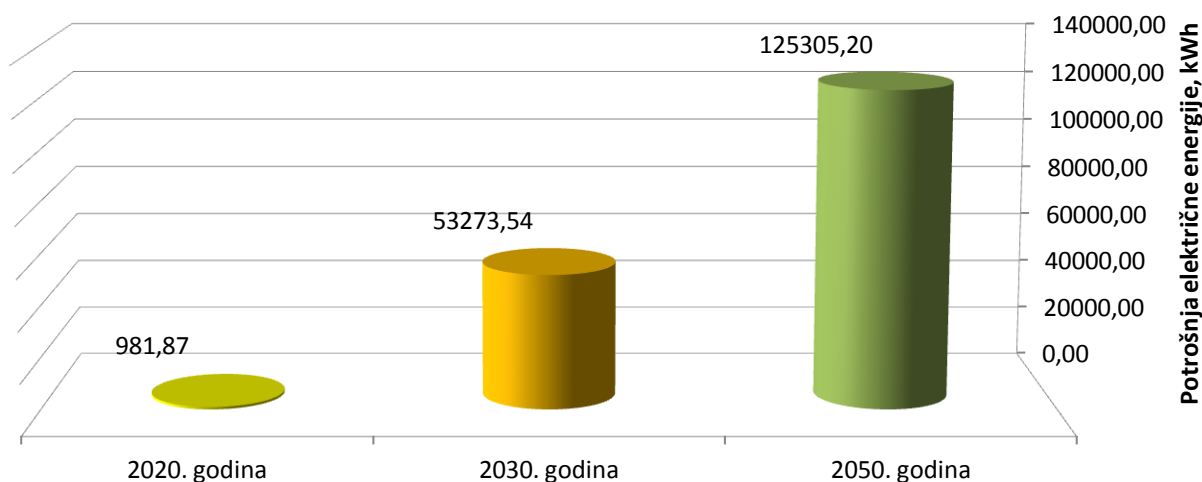
Bilo je potrebno također odrediti očekivano vrijeme punjenja EV, što je vrlo važan podatak prilikom određivanja potrošnje električne energije za punjenje voznog parka. Međutim, ovi podaci variraju od modela do modela. Uzeto je u obzir prosječno vrijeme punjenja EV u trajanju od pet sati koje se u radu navodi kao standardno punjenje. U literaturi se osim standardnog punjenja navodi i brzo punjenje u trajanju od 10 minuta, koji uzimaju u obzir buduće promjene u poboljšanjau vremenu punjenja [27], [28], [29]. U radu nije uzeto u obzir brzo punjenje iz razloga što se proračun vršio na satnoj bazi, ali bi se svakako moglo takvo punjenje razmatrati u budućim ispitivanjima i analizama ciklusa punjenja. U podacima navedenim u [Tablica 5], u obzir je uzeta efikasnost punjenja baterije koja iznosi 90% [30].

Kako bi se odredila ukupna potrošnja električne energije za punjenje EV, potreban je bio podatak o prosječnoj udaljenosti koju vozilo prijeđe za područje Dubrovačke regije. Nije pronađen točan podatak o voznom ciklusu pa se na temelju pretpostavki iz literature odredilo da vozilo u Dubrovačkoj regiji prosječno dnevno prijeđe 45 km [29], [31], [32]. Na temelju tog podatka i podatka broja punjenja u danu, dobio se broj vozila koji se puni u jednom danu [Tablica 6]. Uzima se u obzir pretpostavka da se baterija sa svakim punjenjem puni do kraja.

**Tablica 6. Broj punjenja vozila u jednom danu i broj vozila na raspolaganju za punjenje za sve vrste EV**

| Vrsta vozila | Broj punjenja u danu | Broj vozila za punjenje |              |              |
|--------------|----------------------|-------------------------|--------------|--------------|
|              |                      | 2020. godina            | 2030. godina | 2050. godina |
| MALI         | 0,450                | 22                      | 1188         | 2795         |
| SREDNJI      | 0,346                | 17                      | 914          | 2150         |
| VELIKI       | 0,250                | 12                      | 660          | 1553         |

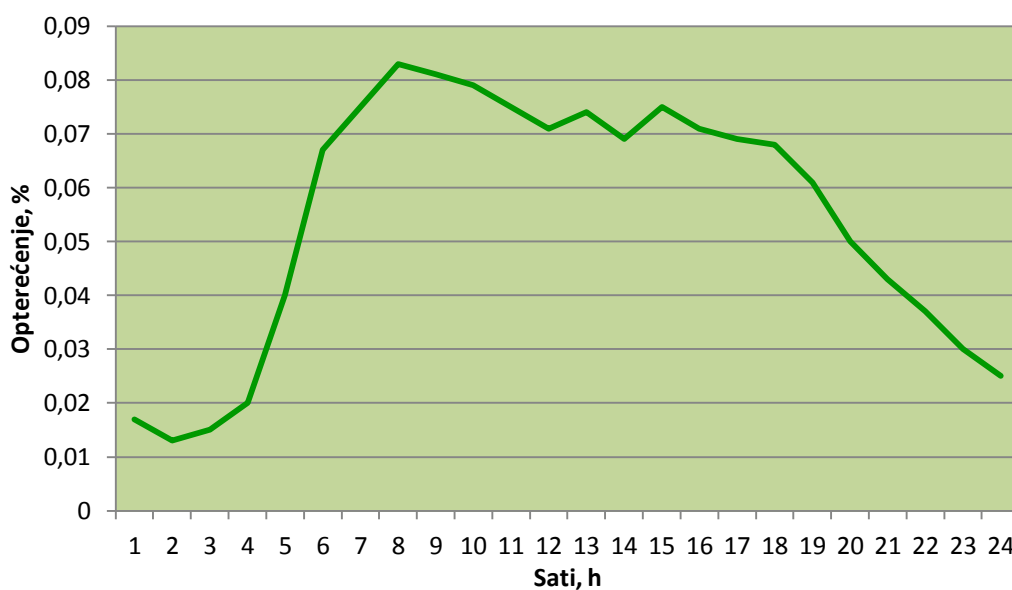
S obzirom na poznati kapacitet baterije svake vrste vozila i potreban broj punjenja u danu dobila se ukupna dnevna potrošnja električne energije za punjenje EV. Ona je bila jednaka za radni dan i dan vikenda.



Slika 16. Dnevna potrošnja električne energije za punjenje EV svaki od scenarija

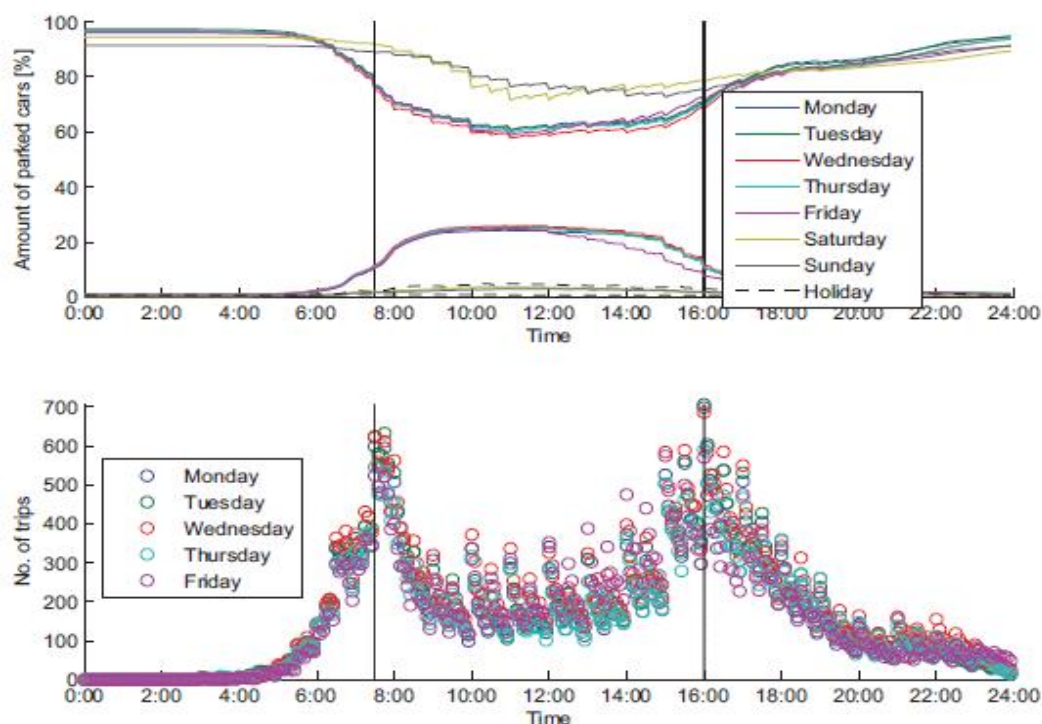
#### 4.2.1.2. Punjenje EV na temelju krivulje opterećenja prometa

U prethodnom dijelu proračuna dobila se ukupna dnevna potrošnja električne energije za punjenje EV prema pretpostavkama o voznim ciklusima. Kako bi se dobila distribucija dnevne potrošnje, a s tim i godišnje potrošnje za punjenje EV, uzela se u obzir krivulja opterećenja prometa na dubrovačkom području. Krivulja opterećenja prometa preuzeta je iz "Prometne studije grada Dubrovnika" u kojoj je prikazano mjereno opterećenje prometa na više lokacija. U svibnju/lipnju 2011. godine izvršeno je brojenje prometa na 27 lokacija. Brojenje prometa je bilježeno ukupno 15 sati i to u periodu od 6 sati i 30 minuta do 21 sat i 30 minuta. Iz podataka o brojenju prometa se može zaključiti da je promet u Gradu Dubrovniku vrlo gust tijekom cijelog dana. Vršni sat je definiran zbrojem prometnih opterećenja raskrižja istih sati za sve brojačke lokacije. Udio prometnog opterećenja pojedinog sata u odnosu na ukupno prometno opterećenje prikazan je na [Slika 17]. Može se zaključiti da, što se tiče prometnog opterećenja, nema znatnih odstupanja tijekom dana, točnije od 7 sati ujutro do 20 sati navečer. Vršni sat je od 8 do 9 sati. Promet je vrlo gust tijekom cijelog dana, posebno u periodu od 8 do 12 sati, a zatim lagano opada. Od 15 do 16 sati je zabilježen najveći promet u poslijepodnevnom satima. Slika prometnog opterećenja dijelom je rezultat nedostatka parkirnih mjesta u gradu što uzrokuju mnogobrojna kružna putovanja [15]. Za dobivanje krivulje korištene su vrijednosti mjerenja za 15 sati u danu dok su se ostale vrijednosti pretpostavile kako bi se dobila krivulja opterećenja za 24 sata.



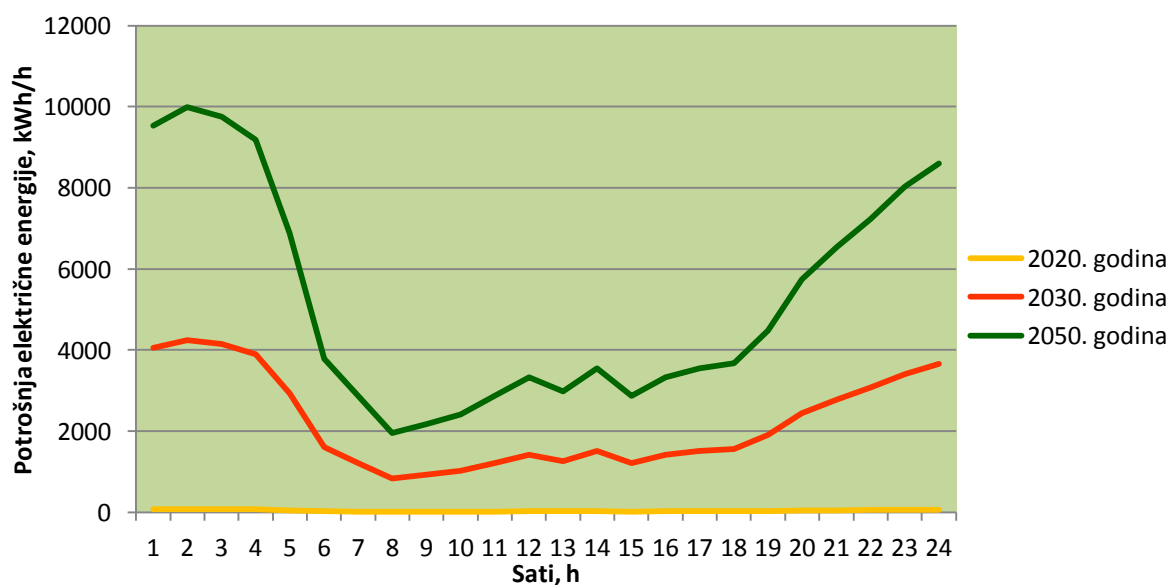
Slika 17. Krivulja opterećenja prometa na području Dubrovnika [15]

Krivulja opterećenja prometa prikazuje dnevni tok prometa u pokretu, odnosno vozila u prometu. Na temelju te krivulje može se dobiti krivulja prometa u mirovanju, odnosno vozila koja su parkirana i na raspolaganju su za punjenje. Na temelju opisa postupka u dostupnoj literaturi napravio se sličan postupak za dubrovačko područje [33]. U članku se uzima u obzir krivulja dnevnog opterećenja prometa za sve dane u tjednu, na temelju koje se dobiva krivulja prometa u mirovanju, odnosno broj vozila dostupnih za punjenje. Na [Slika 18], donji dijagram prikazuje dnevno opterećenje prometa, odnosno broj putovanja za sve dane u tjednu. U ovom slučaju vidimo da je na tom području vršno opterećenje prometa u 8 sati ujutro kada ljudi kreću na posao i ponovo u 16 sati kada se vraćaju s posla. Gornja krivulja u gornjem dijagramu prikazuje postotak parkiranih vozila kod kuće, dok donja krivulja prikazuje postotak parkiranih vozila na poslu za sve dane u tjednu.



Slika 18. Postotak parkiranih vozila i broj putovanja za sve dane u tjednu [33]

Prethodno izračunata dnevna potrošnja električne energije za punjenje EV, za sve zadane scenarije za radni dan i dan vikenda, pretpostavlja kapacitet vozila koja su parkirana i na raspolaganju su za punjenje. S obzirom na taj poznati podatak i na krivulju opterećenja prometa, dobiven je oblik dnevne krivulje potrošnje električne energije za punjenje EV koji se temelji na opterećenju prometa na dubrovačkom području.

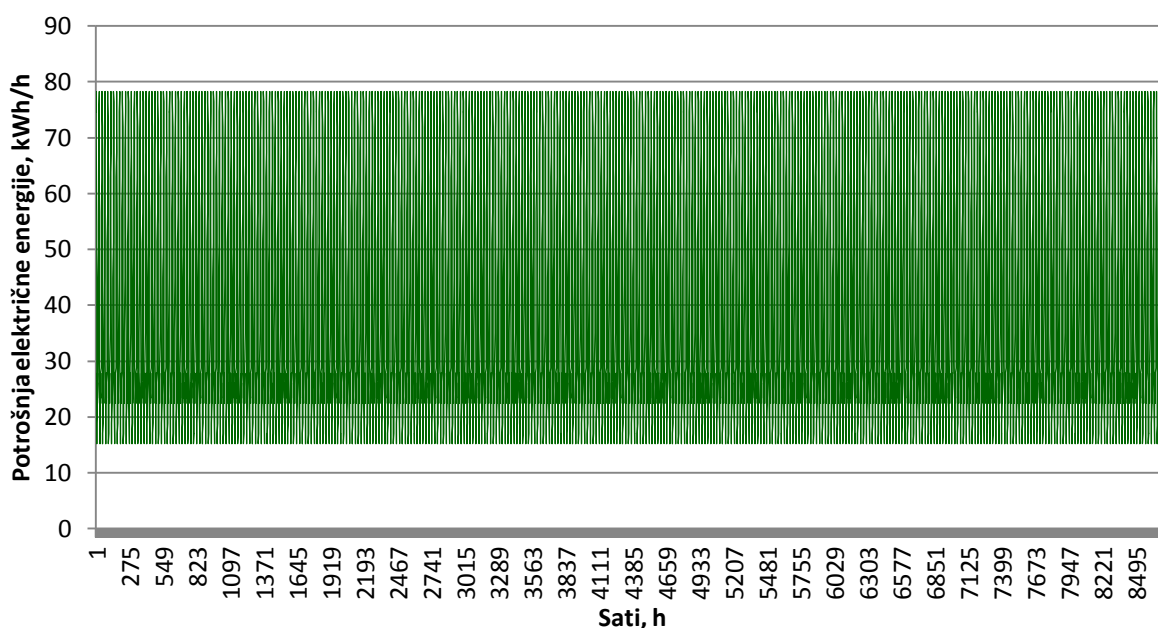


Slika 19. Krivulja dnevne potrošnje električne energije za punjenje EV za sve scenarije

Iz dijagrama [Slika 19] se vidi da kada su vršna opterećenja u prometu tada je najmanji broj vozila na raspolaganju za punjenje, odnosno najmanja je potrošnja električne energije za vrijeme vršnih opterećenja prometa. Jednak tijekom krivulje potrošnje prate krivulje za sve scenarije za 2020., 2030. i 2050. godinu, samo se potrošnja električne energije povećava do 2050. zbog povećanog broja EV.

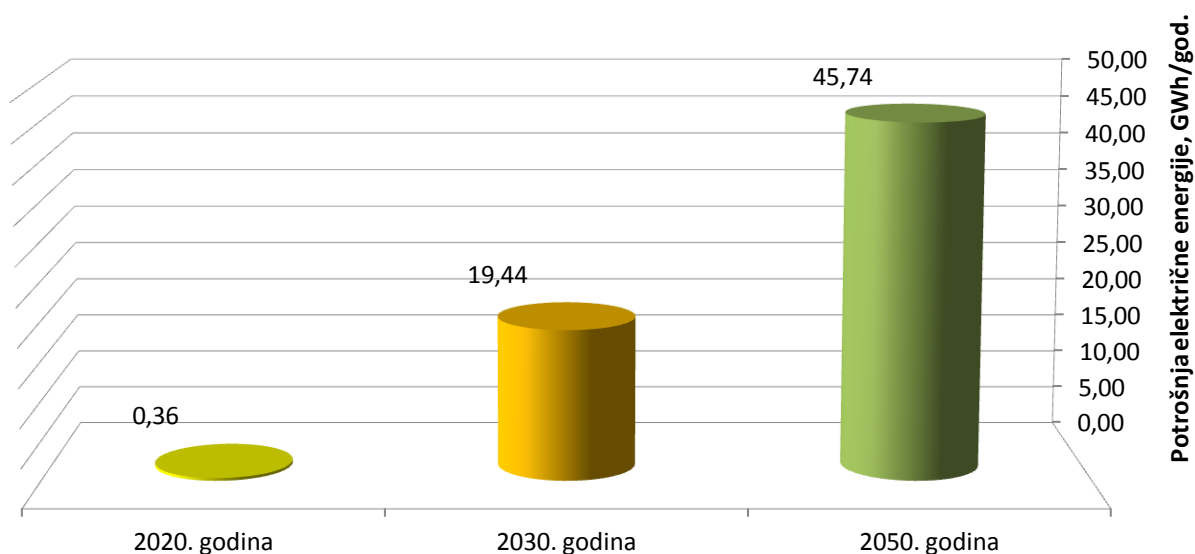
### 4.3. Utjecaj elektrifikacije transporta na krivulju potrošnje električne energije

Nakon provedenog proračuna i dobivenih dnevnih krivulja potrošnje električne energije za punjenje EV za sve scenarije do 2050. godine, dobila se godišnja krivulja potrošnje električne energije sa satnim vrijednostima za zadane godine. U radu se promatrao samo jedan specifičan radni dan i dan vikenda, čija je potrošnja bila jednaka i koje se radi jednostavnosti proračuna razvuklo na cijelu godinu, kako bi se dobila godišnja krivulja potrošnje.



Slika 20. Satna krivulja potrošnje električne energije za punjenje EV u 2020. godini

Kako se da vidjeti iz prethodnog dijagrama, godišnja krivulja potrošnje električne energije za punjenje EV je konstantna tijekom cijele godine zbog toga što se promatrao jedan specifičan dan koji je za radni dan i dan vikenda bio jednak i koji se primijenio na sve dane u godini. Jednak izgled imaju i krivulje za 2030. i 2050. godinu, samo s povećanom potrošnjom električne energije uslijed povećanog broja EV.



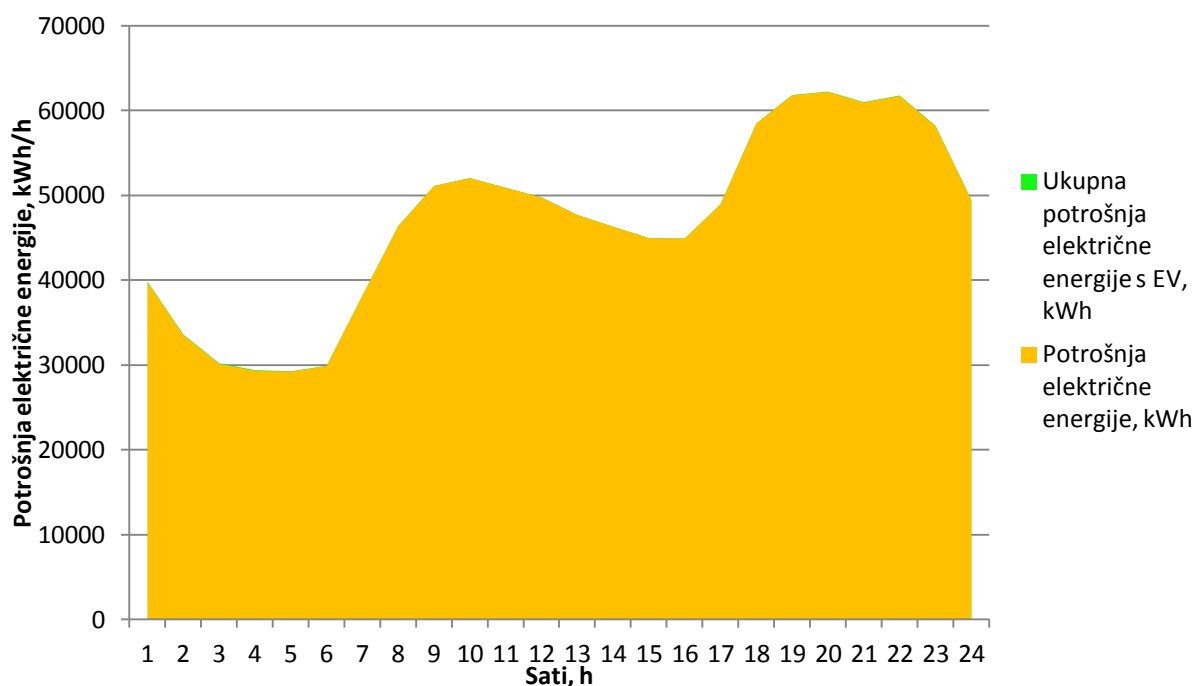
Slika 21. Ukupna godišnja potrošnja električne energije za punjenje EV za svaki pojedini scenarij

#### 4.3.1. Scenarij za 2020. godinu

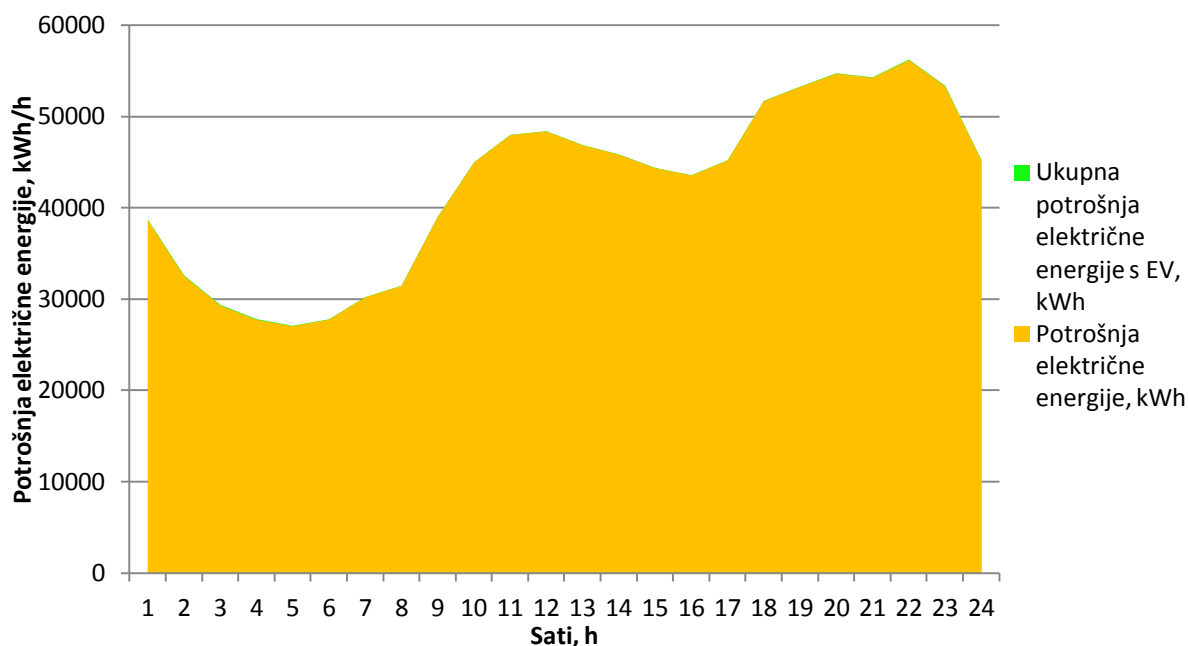
Postojećoj potrošnji električne energije na području Dubrovnika koja se temeljila na podacima dobivenim s trafostanice Komolac i proračunata za sve zadane scenarije, trebala se dodati i krivulja potrošnje električne energije za punjenje EV kako bi se dobila ukupna potrošnja električne energije, izračunata za svaki sat u godini.

$$E_{UK,i} = E_{K,i} + E_{EV,i} \quad (1)$$

Dijagrami [Slika 22, Slika 23] prikazuju ukupnu potrošnju električne energije i utjecaj penetracije EV na krivulju potrošnje električne energije za kućanstva za jedan radni dan i dan vikenda. Iz krivulje potrošnje električne energije za kućanstva odabrana je treća srijeda i nedjelja u mjesecu siječnju.



Slika 22. Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2020. godini za specifičan radni dan



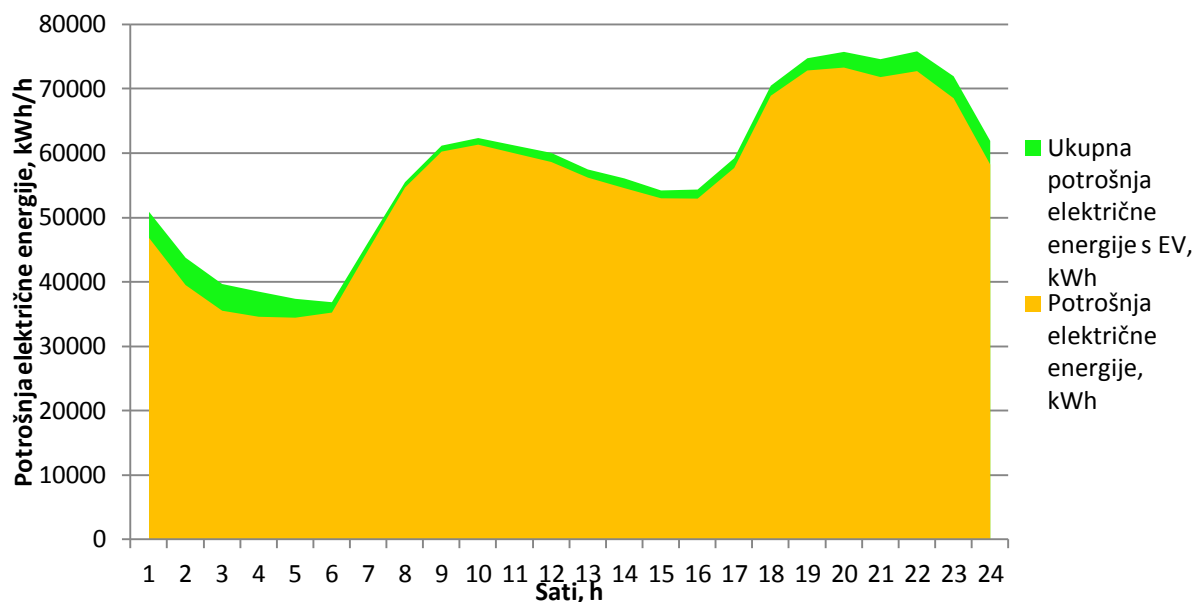
Slika 23. Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2020. godini za specifičan dan vikenda

Vidimo da je u 2020. godini jako mali utjecaj EV na krivulju potrošnje električne energije zbog malog broja EV.

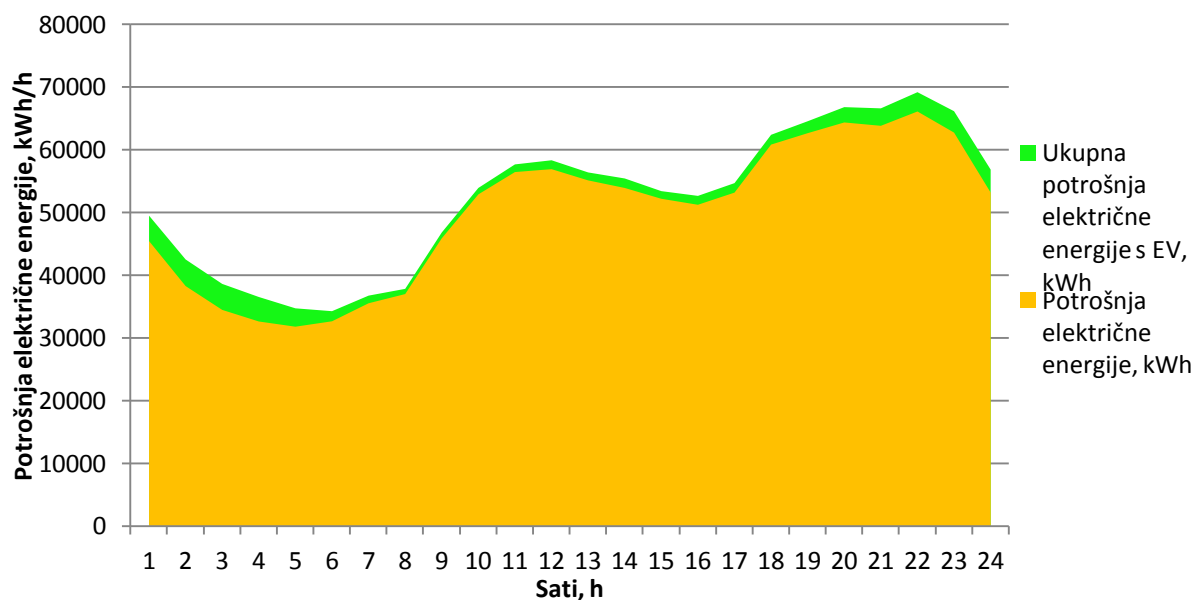


### 4.3.2. Scenarij za 2030. godinu

Za 2030. godinu napravljena je ista stvar kao i za prethodni scenarij i dobio se utjecaj EV na krivulju potrošnje.



Slika 24. Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2030. godini za specifičan radni dan

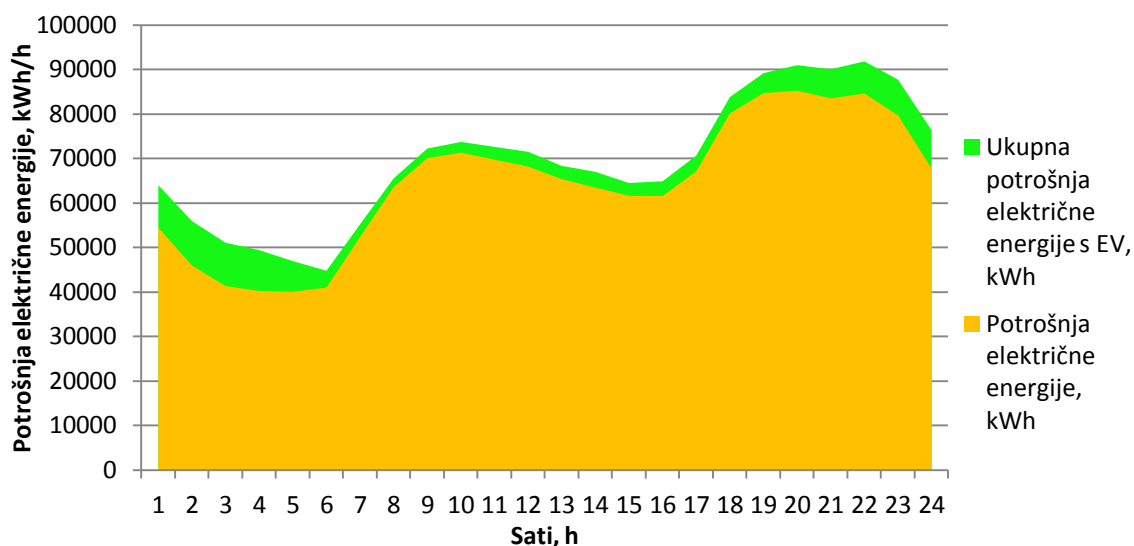


Slika 25. Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2030. godini za specifičan dan vikenda

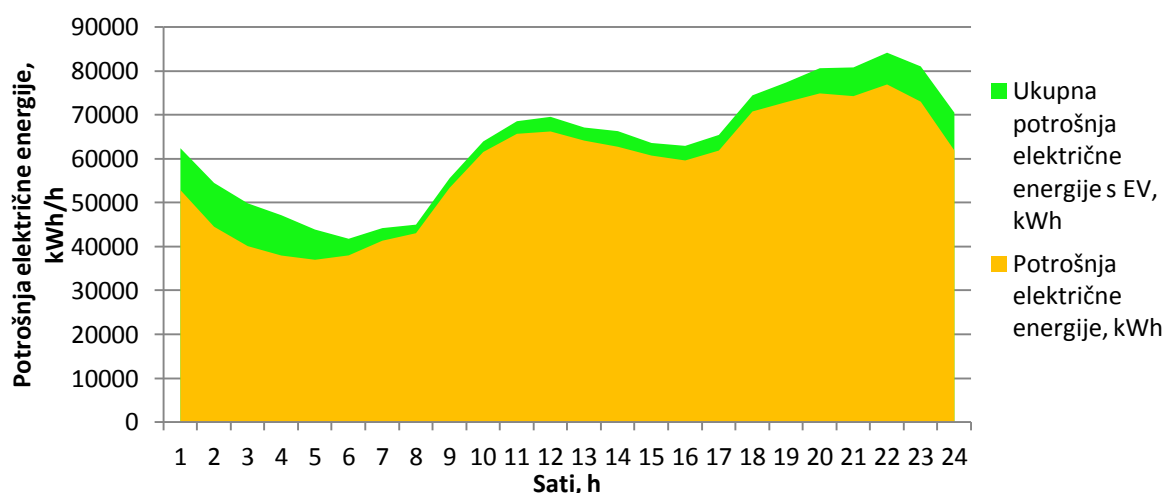
Iz dijagrama [Slika 24, Slika 25] se vidi znatan utjecaj EV na krivulju potrošnje električne energije. EV utječu na povećanje vršnih opterećenja što negativno utječe na EES i planiranu opskrbu električnom energijom.

### 4.3.3. Scenarij za 2050. godinu

U 2050. godini će velika većina vozila biti zamijenjena EV što ima značajan utjecaj na krivulju potrošnje, što je prikazano na sljedećim dijagramima.



Slika 26. Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2050. godini za specifičan radni dan



Slika 27. Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2050. godini za specifičan dan vikenda

Dosadašnji proračun s dobivenim ciklusima punjenja EV ima loš utjecaj na krivulju potrošnje jer povećava vršna opterećenja. Cilj ovog rada je pomoću punjenja EV pokušati što više izgladiti satnu krivulju potrošnje električne energije kako bi odstupanja bila što manja, koja idu u korist lakšem planiranju opskrbe električnom energijom. Zbog toga je bilo potrebno razviti model kojim će se regulirati punjenje električnih vozila u cilju izravnjanja krivulje potrošnje.

#### 4.4. Model regulacije punjenja EV

U svrhu smanjenja utjecaja EV na vršna opterećenja krivulje potrošnje električne energije razrađen je model regulacije punjenja električnih vozila. Prethodno dobivene krivulje potrošnje električne energije za punjenje EV temeljile su se na ciklusima punjenja koji su bili prilagođeni navikama i potrebama ljudi i pokazalo se da negativno utječu na vršna opterećenja. Da bi model regulacije zadovoljio svoj cilj, ne može se podrediti ljudskim potrebama već potrebama elektroenergetskog sustava kako bi omogućio bolje planiranje opskrbe električnom energijom pa su stoga određene sljedeće pretpostavke za regulaciju punjenja EV [34]:

- a) Pretpostavlja se samo noćno punjenje
- b) Satna krivulja opterećenja prometa ne uzima u obzir stvarne vozne cikluse
- c) Pretpostavlja se da je baterija EV uvijek puna na odlasku
- d) Funkcioniranje V2G ne uključuje se u regulaciju snage

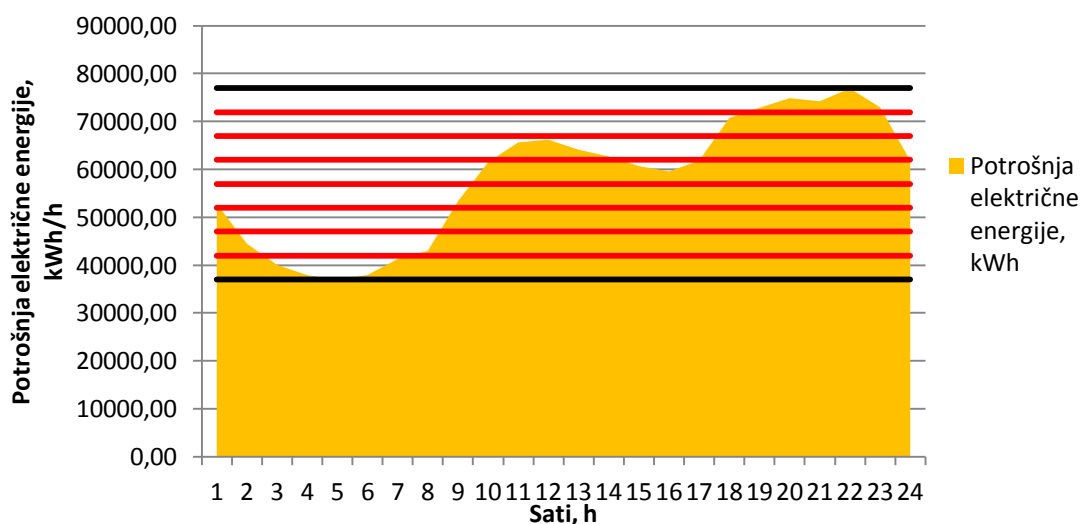
Pametno planiranje može optimalno regulirati punjenje EV u cilju što boljeg izravnjanja krivulje opterećenja energetske sustava. To vodi do smanjenja troškova kapitala i troškova rada [35]. Osnovni princip pametnog punjenja je odrediti raspodjelu krivulje potrošnje priključivanjem EV na mrežu za vrijeme niske potrošnje [36]. Kako bi se smanjile razlike minimalne i maksimalne potrošnje dnevne satne krivulje sustava napajanja, EV trebaju čekati na punjenje na zahtjev sustava, odnosno u vrijeme niske potrošnje. U ovom pristupu udobnost korisnika EV se ne uzima u obzir. Na taj se način može izbjeći nesigurnost i velike razlike maksimalne i minimalne potrošnje [37].

Punjenje EV za vrijeme niske potrošnje smanjuje trošak električne energije. Međutim, kako je poznato iz prakse, kada se velik broj EV puni za vrijeme niske potrošnje električne energije, što je u većini slučajeva za vrijeme noćnih sati, cijena električne energije će se početi povećavati u tom razdoblju s obzirom na nove zahtjeve za potrošnjom električne energije. Model elastičnosti cijene energije uslijed punjenja EV prikazan je u [38], ali u radu nije uzeto u obzir. Proračun je rađen na temelju postojećih cijena električne energije koje će se do 2050. sigurno mijenjati i te će imati drugačiji izgled.

Optimalne strategije punjenja EV s optimizacijom troška električne energije i očuvanja baterije date su u literaturi [39]. U ovom radu se ne uzimaju u obzir ograničenja niskonaponske mreže, zbog toga što se smatra da će za buduće scenarije do 2050. doći do

mnogih poboljšanja u elektroenergetskom sustavu pa se EV ne trebaju podvrgavati tim ograničenjima. U literaturi [40], [41] predložene su metode planiranja punjenja velikog broja EV koja se podvrgavaju ograničenjima niskonaponske distribucijske mreže.

Proračun je rađen u cilju smanjenja troška električne energije i izravnjanja satne krivulje potrošnje. S obzirom na postavljene zahtjeve određene su granice punjenja EV koje su podijeljene između maksimalnog i minimalnog opterećenja na satnoj krivulji potrošnje odabranoj za jedan radni dan i dan vikenda u tjednu. Krivulja potrošnje električne energije ( $E_K$ ) za jedan specifični dan ima svoj maksimum ( $E_{MAX}$ ) i minimum ( $E_{MIN}$ ). Unutar tih vrijednosti krivulja se podijelila na više graničnih vrijednosti. Određena je srednja vrijednost i još tri granične vrijednosti prema minimalnoj vrijednosti i prema maksimalnoj vrijednosti. One su označene s  $E_{G,m}$  i predstavljaju devet granica punjenja gdje je  $m = 1 \dots 9$ . Podjela je prikazana na sljedećem dijagramu.



Slika 28. Dnevna potrošnja električne energije s granicama punjenja EV

$$E_{MIN} = E_{G,1} \quad (2)$$

$$E_{MAX} = E_{G,9} \quad (3)$$

$$E_{SV} = \frac{E_{MAX} + E_{MIN}}{2} = E_{G,5} \quad (4)$$

Tablica 7. Formule za izračun granica punjenja između maksimalne i minimalne vrijednosti dnevne krivulje potrošnje električne energije

| $E_{G,2}, [kWh]$                          | $E_{G,3}, [kWh]$                         | $E_{G,4}, [kWh]$                          | $E_{G,6}, [kWh]$                         | $E_{G,7}, [kWh]$                        | $E_{G,8}, [kWh]$                         |
|---|--|---|--|---|--|
| $(E_{SV} - E_{MIN}) \cdot 0,25 + E_{MIN}$ | $(E_{SV} - E_{MIN}) \cdot 0,5 + E_{MIN}$ | $(E_{SV} - E_{MIN}) \cdot 0,75 + E_{MIN}$ | $(E_{MAX} - E_{SV}) \cdot 0,25 + E_{SV}$ | $(E_{MAX} - E_{SV}) \cdot 0,5 + E_{SV}$ | $(E_{MAX} - E_{SV}) \cdot 0,75 + E_{SV}$ |

Regulacija se proračunavala u Excelu pomoću *Solvera* prema (5) i (6).

$$T_i = E_{UK,i} \cdot C_{VT} \quad (5)$$

$$T_i = E_{UK,i} \cdot C_{NT} \quad (6)$$

$T_i$  predstavlja trošak električne energije u pojedinom satu u danu ( $i = 1...24$ ).  $C_{VT}$  je cijena električne energije po visokoj tarifi i iznosi 0,91 kn/kWh, a računa se za vrijeme od 7 do 21 sat u zimskom preiodu i za vrijeme od 8 do 22 sata u ljetnom periodu.

$C_{NT}$  cijena električne energije po niskoj tarifi i iznosi 0,45 kn/kWh, a računa se za vrijeme od 21 do 7 sati u zimskom preiodu i za vrijeme od 22 do 8 sati u ljetnom periodu. U radu je odabrano zimsko računanje vremena jer su za proračun odabrani treća srijeda i nedjelja u mjesecu siječnju [42].

Zadan je uvjet u *Solveru*:

$$T_{min} = \min \left[ \sum_1^{24} T_i \right] \quad (7)$$

Ovaj uvjet je zadan kako bi se EV punila s ciljem što manjeg konačnog troška, u što spadaju noćni sati jer se tada cijena električne energije računa prema nižoj tarifi.

U *Solveru* je zadano da se mijenjaju satne vrijednosti potrošnje električne energije za punjenje električnih vozila ( $E_{EV,i}$ ) ispisane u ćelijama u Excelu, uz uvjet da im suma ostane konstantna. Cilj je zadovoljiti dnevnu potrošnju električne energije uslijed punjenja EV, ali će se ona rasporediti unutar 24 sata prema ostalim uvjetima. Bitno je također zadati uvjet da vrijednost  $E_{EV,i}$  ne bude manja od nule, kao i da ne bude veća od maksimalne vrijednosti potrošnje električne energije ( $E_{EV,MAX}$ ) uslijed punjenja koju bi bilo moguće ostvariti ako bi sva vozila u isto vrijeme bila priključena na punjače.

$$0 \leq E_{EV,i} \leq E_{EV,MAX} \quad (8)$$

$$\sum_1^{24} E_{EV,i} = konst. \quad (9)$$

Kako bi se postiglo što bolje izravnanje krivulje potrošnje dodana su još dva uvjeta, a to je da potrošnja ne smije biti veća od gornje granice punjenja ( $E_{G,m}$ ), niti biti manja od donje granice punjenja ( $E_{G,m-1}$ ).

$$E_{G,m-1} \leq E_{UK,i} \leq E_{G,m} \quad (10)$$

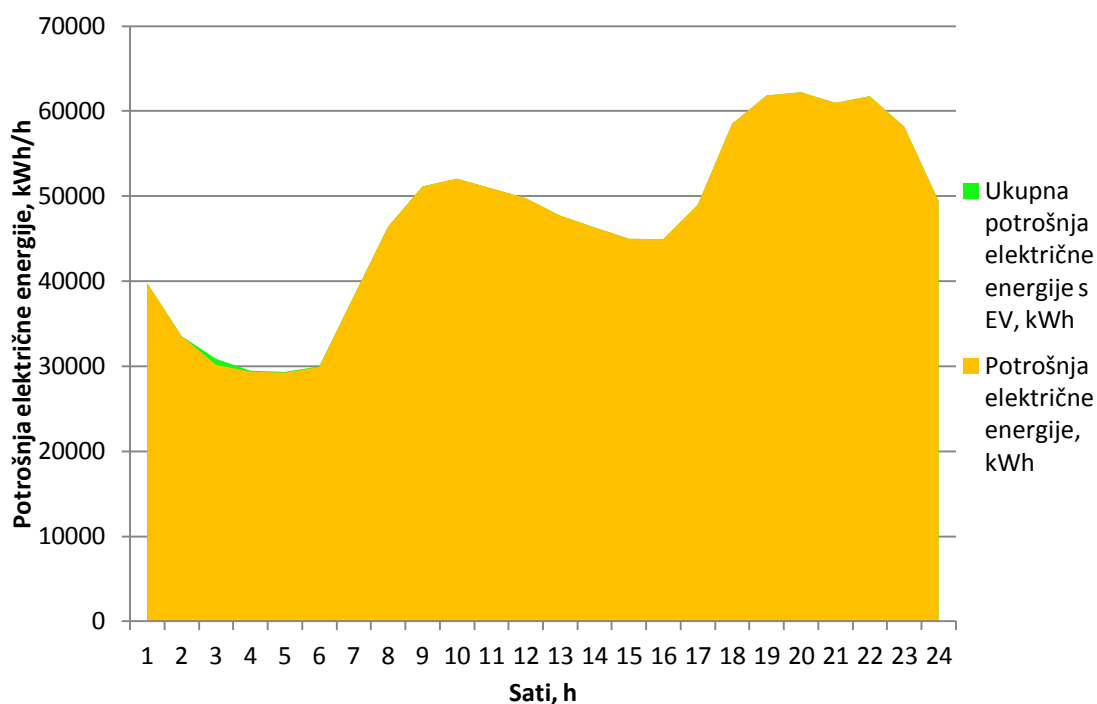
Proračun je napravljen za svaki od scenarija za radni dan i dan vikenda.

## 5. REZULTATI PRORAČUNA

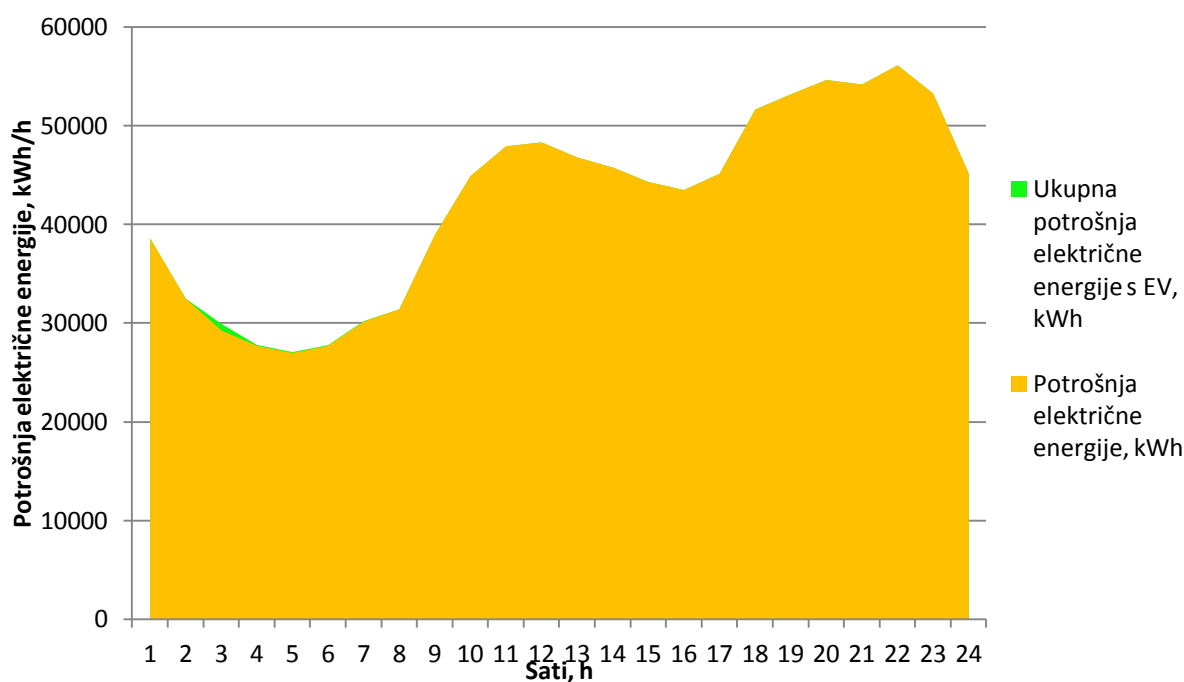
Primjenjujući razvijeni model regulacije punjenja EV na prethodno dobivenim rezultatima, dobio se novi oblik krivulje potrošnje električne energije. Kao što je već prije spomenuto, regulacija nije podređena utjecaju navika i potreba ljudi već potrebama elektroenergetskog sustava s ciljem poravnivanja krivulje potrošnje električne energije.

### 5.1. Rezultati scenarija za 2020. godinu

Prema postojećim proračunatim podacima za 2020. godinu i razrađenom modelu regulacije punjenja EV, za jedan radni dan i dan vikenda u godini, dobiveni su sljedeći rezultati.



Slika 29. Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan radni dan u 2020. godini



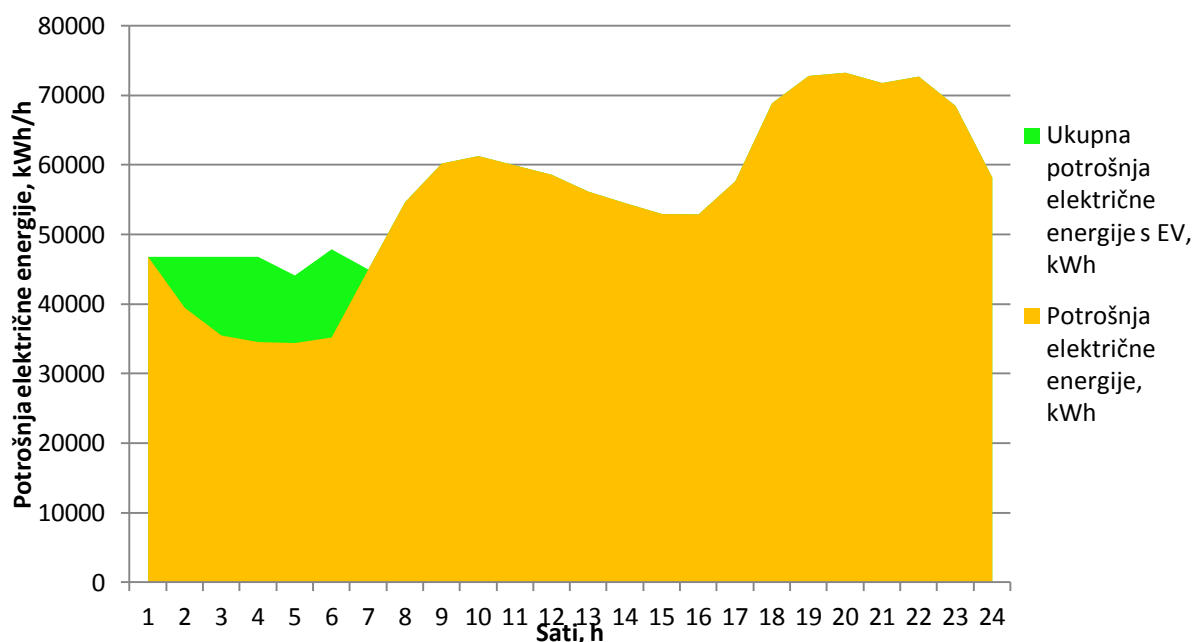
Slika 30. Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan dan vikenda u 2020. godini

Zbog malog broja električnih vozila u 2020. godini, njihov utjecaj na krivulju potrošnje električne energije nije značajan. U cilju smanjenja utjecaja EV na vršna opterećenja, regulacijom se odredilo da se vozila pune noću i to u vremenu kada je potrošnja električne energije minimalna. Punjenje se odvijalo između sljedećih granica punjenja, za radni dan i dan vikenda.

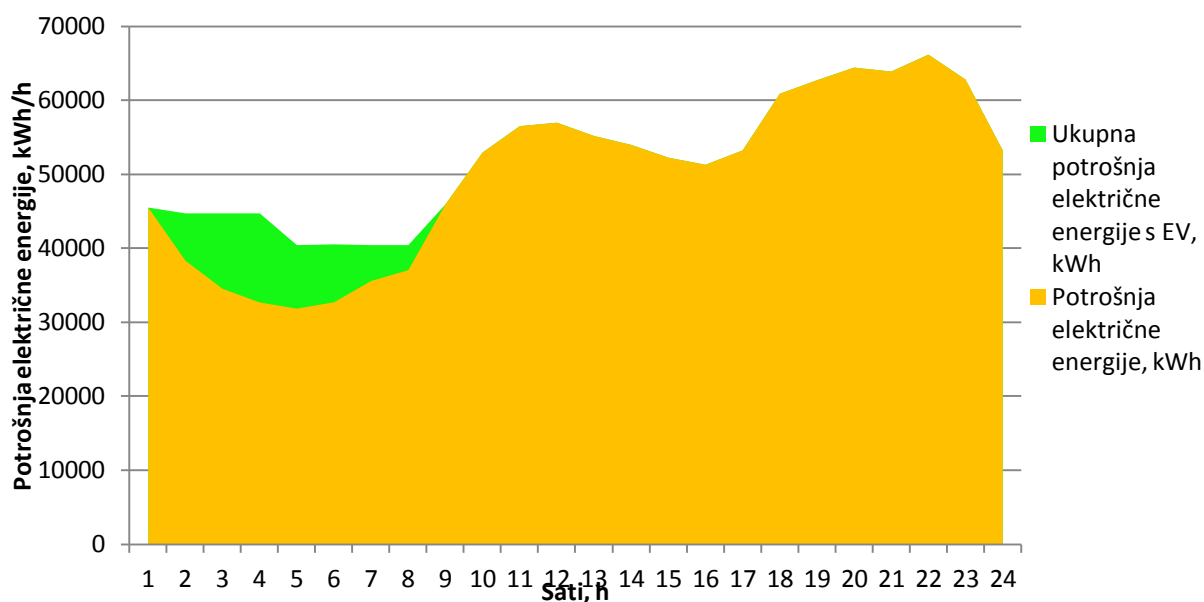
$$E_{MIN} \leq E_{UK,i} \leq E_{G,2} \quad (11)$$

## 5.2. Rezultati scenarija za 2030. godinu

U 2030. godini veća je penetracija EV pa je i veći utjecaj na krivulju potrošnje električne energije. Reguliranim punjenjem smanjen je utjecaj EV na vršna opterećenja.



Slika 31. Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan radni dan u 2030. godini



Slika 32. Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan dan vikenda u 2030. godini

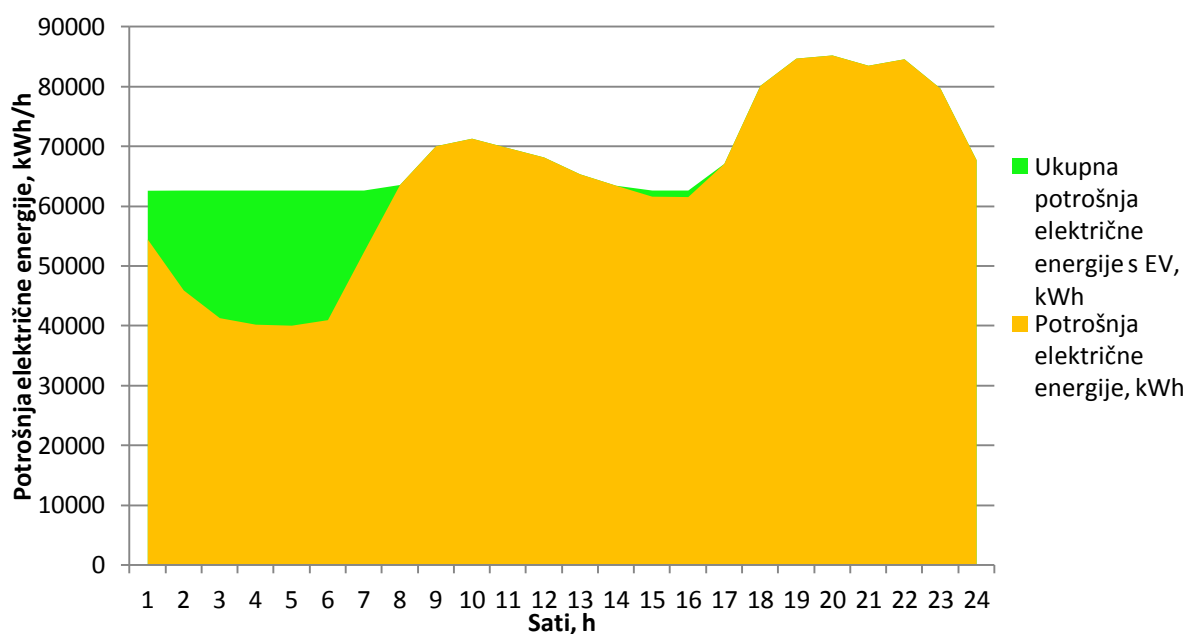
Iz prikazanih rezultata vidi se da je regulacijom određeno punjenje EV tijekom noćnih sati kada je manja potrošnja električne energije. Za radni dan i dan vikenda regulacija je određena sljedećim granicama punjenja.

$$E_{G,2} \leq E_{UK,i} \leq E_{G,3} \quad (12)$$

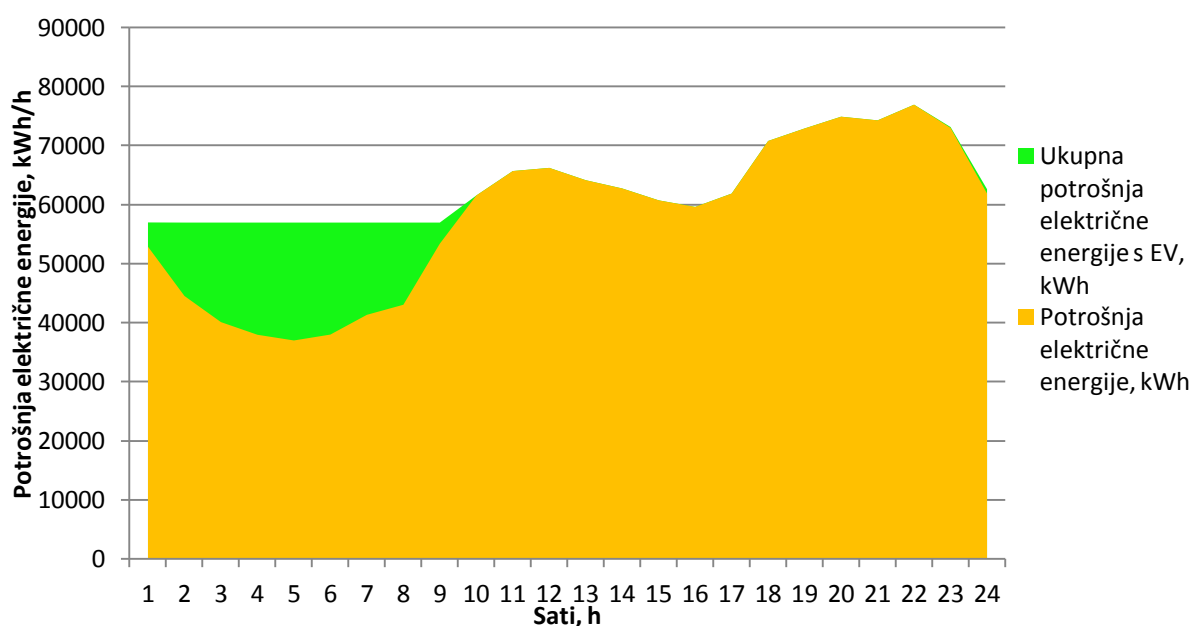


### 5.3. Rezultati scenarija za 2050. godinu

Scenarij za 2050. godinu ima visoku penetraciju EV i pretpostavka je da će skoro sva vozila biti električna što ima značajan utjecaj na krivulju potrošnje električne energije i na povećanje vršnih opterećenja. Regulacijom je dobiveno da se EV pune tijekom noći ali u ovom scenariju dio vozila se puni i tijekom dana.



Slika 33. Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan radni dan u 2050. godini



Slika 34. Prikaz utjecaja elektrifikacije transporta s reguliranim punjenjem na krivulju potrošnje električne energije za jedan specifičan dan vikenda u 2050. godini

Vidimo da je u 2050. godini regulacija punjenja EV dovela do pozitivnog rezultata krivulju potrošnje električne energije koji ide u prilog planiranju opskrbe elektroenergetskog sustava. Cilj rada jest da penetracijom električnih vozila dođe do izravnjanja krivulje potrošnje. Za radni dan i dan vikenda regulacija je određena sljedećim granicama punjenja.

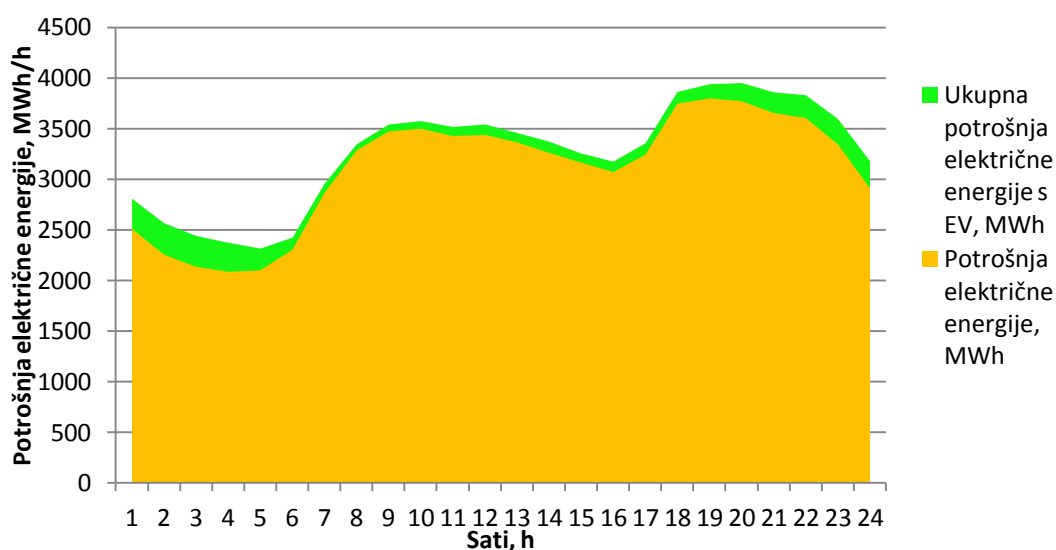
$$E_{G,3} \leq E_{UK,i} \leq E_{G,4} \quad (13)$$

Kako elektrifikacija transporta dovodi do povećanja u ukupnoj potrošnji električne energije potrebno je osigurati povećanu instaliranu snagu za opskrbu potrošnje. Povećanu opskrbu potrebno je zadovoljiti proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije, što uključuje energiju Sunčeva zračenja i energiju vjetra. Poznato je da je proizvodnja iz OIE nestalna, nije uvijek na raspolaganju kada je potrebna. Zbog toga je potrebno izvršiti pametno energetske planiranje opskrbe energijom kako bi se zadovoljile potrebe. Proračunom u Excelu dobiveni su podaci o potrebnoj električnoj energiji koju treba osigurati za sve scenarije do 2050. godine. Ti podaci korišteni su kao ulazni podaci u programu EnergyPLAN u kojem se razradila strategija energetske planiranja u cilju što optimalnijeg zadovoljenja potreba za električnom energijom.

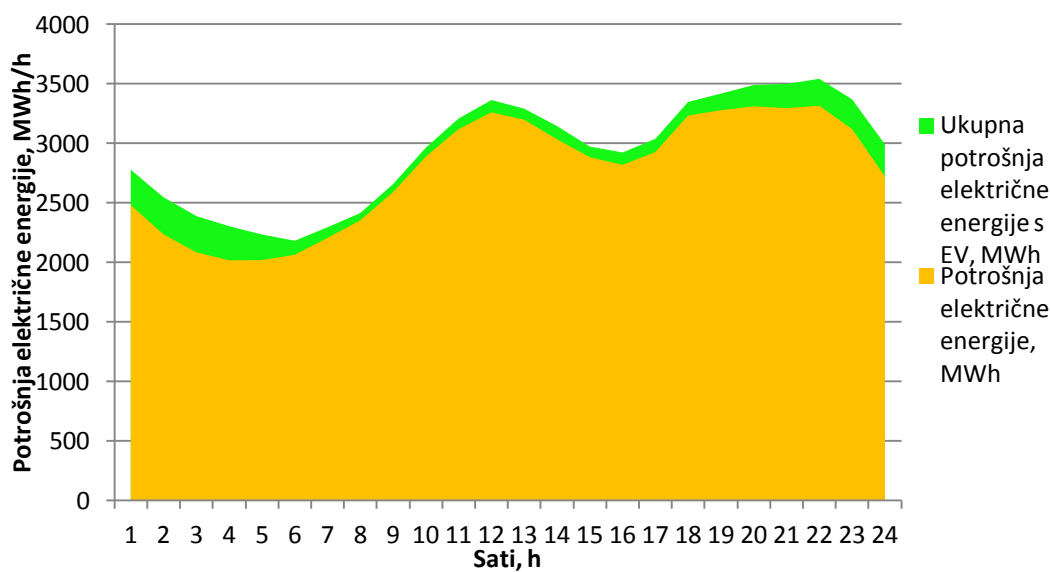
#### **5.4. Osvrt na utjecaj uvođenja EV na potrošnju električne energije u u Republici Hrvatskoj**

S obzirom na poznat broj EV i poznatu satnu distribuciju potrošnje električne energije za Republiku Hrvatsku, bilo je moguće grubom procjenom odrediti i utjecaj penetracije EV na krivulju potrošnje električne energije. Kako bi se odredila ukupna dnevna potrošnja električne energije za punjenje EV, bilo je potrebno napraviti isti proračun kao i za Dubrovačku regiju. Koristili su se isti vojni ciklusi kao i za Dubrovnik s istom krivuljom opterećenja prometa, na temelju kojih se dobila distribucija dnevne potrošnje električne energije. Ovaj prikaz predstavlja samo grubu procjenu, dok bi se s boljom analizom voznih ciklusa za Hrvatsku dobile bolje procjene za potrošnju električne energije uslijed punjenja EV. Na dijagramima [Slika 35], [Slika 36], prikazan je utjecaj potrošnje električnih vozila na distribuciju krivulje potrošnje električne energije za Hrvatsku, za 2030. godinu za jedan radni dan i dan vikenda.

U [Tablica 8] dati su rezultati utjecaja penetracije na vršna opterećenja satne krivulje potrošnje Republike Hrvatske za 2020., 2030. i 2050.. Povećanje vršnog opterećenja je veće vikendom zbog toga što je manja potrošnja električne energije nego radnim danom.



Slika 35. Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2050. godini za specifičan radni dan



Slika 36. Ukupna potrošnja električne energije s penetracijom električnih vozila u 2030. godini za specifičan dan vikenda

Tablica 8. Utjecaj potrošnje električne energije za punjenje EV na vršno opterećenje satne krivulje potrošnje

| GODINA | POVEĆANJE VRŠNOG OPTEREĆENJA,<br>MWh/h (RADNI DAN) | POVEĆANJE VRŠNOG OPTEREĆENJA,<br>MWh/h (DAN VIKENDA) |
|--------|--|--|
| 2020.  | 2,6  | 4,2  |
| 2030.  | 151,6  | 225,7  |
| 2050.  | 389,3  | 530,9  |

## 6. OPTIMIZACIJA ENERGETSKOG SUSTAVA DUBROVAČKE REGIJE POMOĆU PROGRAMA EnergyPLAN

U modelu prvog pristupa prikazana je analiza proračuna utjecaja penetracije EV na satnu krivulju potrošnje električne energije i metoda regulacije punjenja u cilju smanjenja troška i smanjenja utjecaja potrošnje električne energije za punjenje EV na vršna opterećenja distribucijske krivulje. Drugi pristup obuhvaća energetske planiranje cjelokupnog energetskeg sustava u programu EnergyPLAN za sve zadane scenarije do 2050.. Model EnergyPLAN-a obuhvaća analizu cjelokupnog EES, koji na temelju ulaznih podataka daje izlazne rezultate nakon provedene regulacije odnosa komponenti energetskeg sustava u cilju optimizacije [9]. EnergyPLAN koristi podatke o kapacitetima i efikasnosti energetskeg pretvorbi unutar sustava i ulazne podatke o raspoloživim gorivima i obnovljivim izvorima energije. Proračuni se provode za svaki sat kroz godinu za 8784 sata.

Kako je već prije spomenuto, OIE zbog svoje intermitentne proizvodnje ne predstavljaju pouzdanu opskrbu elektroenergetskom sustavu, što predstavlja izazov u planiranju takvih sustava jer su visoki zahtjevi u pogledu regulacije. Neki od modela regulacije obnovljivih izvora unutar energetskeg sustava opisani su u [43], [44], na čijem se razvoju nastoji napredovati u cilju postizanja održivog razvoja. Koncept naprednih mreža (*smart grids*) uključuje nova rješenja za infrastrukturu distribucije električne energije u budućnosti. Uvođenjem aktivnih izvora (distribucija proizvodnje, opterećenja, spremnici, EV), koji će ostvarivanjem međusobne komunikacije aktivno djelovati u EES, tradicionalna pasivna distribucija mreže postaje aktivna. Nova rješenja za mrežu i aktivni izvori zahtijevaju implementaciju ICT tehnologija u regulaciji mreže koje predstavljaju osnovu u radu naprednih mreža. Napredne mreže omogućuju aktivno sudjelovanje potrošača na tržištu i također imaju utjecaj na promjene u poslovnom okruženju. One predstavljaju tržište kojima upravlja potrošač u svrhu regulacije odnosa između distribucije proizvodnje i potrošača [45]. Karakteristike pametnih mreža su [46]:

- interakcija potrošača i tržišta,
- primjena i prilagodba promjenama,
- optimizacija u cilju što boljeg iskorištavanja izvora i opreme,
- u slučaju hitne intervencije više su proaktivne nego reaktivne
- integracija, kontrola, zaštita, održavanje, napredne ICT tehnologije,

- sigurnost i pouzdanost.

Tradicionalne mreže uključuju centraliziranu proizvodnju električne energije, a distribucija se odnosi na samo jedan smjer energetskog toka. S druge strane pametne mreže obuhvaćaju centraliziranu i distribuiranu proizvodnju električne energije, većinom iz OIE. One implementiraju distribuirane i aktivne izvore u energetska tržišta i energetske sustave. Mogu se opisati kao upravljanje višesmjernim tokovima energije [45]. Rad se ne bavi detaljnim osvrtom na napredne mreže, ali one predstavljaju bitan faktor u regulaciji sustava, koji se u radu analizira, prilikom njegove realizacije.

Za izradu energetskog plana bilo je potrebno u EnergyPLAN unijeti ulazne podatke o proizvodnji iz OIE, potrošnji električne energije koju treba zadovoljiti iz proizvodnje i podaci prometnog sektora koji uključuju EV i modele punjenja. Cilj planiranja je optimizirati energetski sustav u svrhu smanjenja vršne proizvodnje iz obnovljivih izvora i utjecaja penetracije EV na krivulju potrošnje električne energije pomoću više vrsta modela punjenje EV. Analizirani su modeli punjenja i njihov utjecaj na proizvodnju i potrošnju električne energije u regulaciji energetskog sustava i prikazani su scenariji za različite modele punjenja opisani u daljnjem tekstu.

### **6.1. Ulazni podaci za proračun u EnergyPLAN-u**

Ulazni podaci za planiranje energetskog sustava u EnergyPLAN-u dijele se na:

- potrošnju energije (toplinska, električna, potrošnja energije u transportu i druge),
- jedinice za proizvodnju energije i izvori energije (vjetroturbine, elektrane, spremnici i druge), uključujući jedinice za pretvorbu energije,
- regulaciju (definiranje regulacije i procesa rada svake elektrane i samog sustava uključujući određena tehnička ograničenja kao što su prijenosni kapaciteti),
- troškove energenata [47].

U ovom radu u obzir se uzima samo električna energija, a jedinice za proizvodnju energije koriste obnovljive izvore. Od ulaznih podataka za proračun u EnergyPLAN-u razmatrat će se potrošnja električne energije koju je u sustavu potrebno zadovoljiti, proizvodnja električne energije iz OIE i transportni sustav koji također spada u potrošnju električne energije, a isto tako može sudjelovati u proizvodnji električne energije ako se koriste modeli V2G koji su namijenjeni opskrbi elektroenergetskog sustava u vrijeme manjka proizvodnje.

### 6.1.1. Unos podataka o proizvodnji električne energije

Za proizvodnju energije iz OIE potrebno je bilo unijeti podatke o instaliranoj snazi postrojenja i satne krivulje proizvodnje za razdoblje tijekom cijele godine. Na temelju prikupljenih podataka o energiji vjetra, Sunčeva zračenja i HE Dubrovnik dobile su se krivulje satne proizvodnje iz OIE. One su bile jednake za svaki scenarij samo su se mijenjale instalirane snage svake elektrane koje bi se ravnomjerno raspodijelile prema satnoj distribuciji.

| Change | Renewable Energy Source | Capacity: MW | Stabilisation share | Distribution profile    | Estimated Production TWh/year | Correction factor | Estimated Post Correction production |
|--------|-------------------------|--------------|---------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Change | Wind                    | 1000         | 0                   | Change Hour_wind_1.txt  | 2,07                          | 0                 | 2,07                                 |
| Change | Photo Voltaic           | 500          | 0                   | Change Hour_wind_1.txt  | 1,04                          | 0                 | 1,04                                 |
| Change | Wave Power              | 0            | 0                   | Change Hour_solar_prod1 | 0,00                          | 0                 | 0,00                                 |
| Change | River Hydro             | 0            | 0                   | Change Hour_solar_prod1 | 0,00                          | 0                 | 0,00                                 |

Slika 37. Unos podataka o proizvodnji električne energije iz OIE

Instalirana snaga vjetroturbina, označena zelenom bojom na [Slika 37], za buduće scenarije pretpostavljena je na temelju kapaciteta koji su predviđeni od strane Ministarstva gospodarstva Republike Hrvatske za područje Dubrovačko-neretvanske županije. Predviđeni kapaciteti instalirane snage iznose 640 MW, a u radu je uzeto da će u 2020. biti instalirano 5% predviđenog kapaciteta, u 2030. 25%, a u 2050. 50% predviđenog kapaciteta [48].

Za instaliranu snagu solarnih fotonaponskih sustava, označenu žutom bojom, uzeto je da za područje Dubrovačke regije instalirana snaga fotonaponskih sustava iznosi 750 W po stanovniku [49]. Područje koje obuhvaća Dubrovačka regija i koje se uzima u obzir u ovom radu, ima 50000 stanovnika. Ako bi svaka kuća na području Dubrovnika imala postavljene fotonaponske sustave na svom krovu, ukupna instalirana snaga iznosila bi 36 MW. Za 2020. godinu pretpostavlja se da će 25% od ukupne instalirane snage biti postavljeno na krovovima kuća. U 2030. će 50% krovova imati postavljene fotonaponske sustave, a u 2050. bi sve kuće na svojim krovovima trebale imati postavljene solarne sustave, to jest 36 MW snage.

Ulazni podaci za HE Dubrovnik označeni su narančastom bojom i predstavljaju podatke instalirane snage i satne krivulje proizvodnje.

Satna krivulja proizvodnje uzeta je iz 2010. godine, a hidroelektrana ima instaliranu snagu od 108 MW za dubrovačko područje. S obzirom da je elektrana u pogonu veći dio godine i da radi većim dijelom s maksimalnim opterećenjem, u EnergyPLAN je unesena kao protočna. Također nije uzeto u obzir proširenje HE Dubrovnik blokom dva, što će joj sigurno omogućiti puno fleksibilniju proizvodnju i mogućnost regulacije. Kako elektrana snabdijeva šire područje Dubrovnika nego što se uzima u obzir u radu, bilo je potrebno smanjiti instaliranu snagu za svaki scenarij. S obzirom da je hidroelektrana vrsta elektrane koja pokriva vršna opterećenja, u radu se prilikom određivanja kapaciteta uzelo u obzir da instalirani kapacitet pokrije vršno opterećenje za godinu koja se proračunava. Tako je u 2020. instalirana snaga iznosila 70 MW, u 2030. 85 MW i 2050. godini 100 MW.

### 6.1.2. Unos podataka o potrošnji električne energije

Podaci o potrošnji električne energije unose se u prozor "Electricity Demand" u EnergyPLAN. Za izradu proračuna korišteni su podaci o godišnjoj potrošnji električne energije (*Electricity Demand*), koji su na [Slika 38] označeni narančastom bojom i podaci o fleksibilnoj potrošnji (*Flexible Demand*) označeni žutom bojom.

| Parameter                        | Value | Unit     | Notes   |
|----------------------------------|-------|----------|---|
| Electricity demand:              | 20    | TWh/year | Change distribution Hour_electricity.txt                              |
| Electric heating (IF included)   | 0     | TWh/year | Subtract electric heating using distribution from 'individual' window |
| Electric cooling (IF included)   | 0     | TWh/year | Subtract electric cooling using distribution from 'cooling' window    |
| Sum (Demand excl. elec. heating) | 20,00 | TWh/year |   |
| Electric heating (individual)    | 0,00  | TWh/year |   |
| Electric cooling (cooling)       | 0,00  | TWh/year |   |
| Flexible demand (1 day)          | 0     | TWh/year | Max-effect 1000 MW  |
| Flexible demand (1 week)         | 0     | TWh/year | Max-effect 1000 MW  |
| Flexible demand (4 weeks)        | 0     | TWh/year | Max-effect 1000 MW  |
| Fixed Import/Export              | 0     | TWh/year | Change distribution Hour_Tysklandsexport.txt                          |
| Total electricity demand         | 20,00 | TWh/year |   |

Slika 38. Unos podataka o potrošnji električne energije u EnergyPLAN

Potrošnja električne energije definira se godišnjom vrijednosti potrošnje električne energije,  $D_E$ , (TWh/god.), koja se raspoređuje prema satnoj krivulju potrošnje za određenu godinu za koju se proračun izvodi. Vrijednosti i satne distribucije prikazane su u prethodnom tekstu za sve zadane scenarije do 2050.. Za proračun svakog scenarija unesena je odgovarajuća krivulja i godišnja vrijednost potrošnje električne energije. Također se u proračunu koristila i fleksibilna potrošnja električne energije i to za potrošnju električne energije u transportu.

Model fleksibilne potrošnje koristi satnu distribucijsku krivulju potrošnje električne energije, definiranu u ulaznim podacima kao vanjski ulazni podatak. U obzir se, osim transporta, mogu uzeti i drugi ulazni podaci. Potrošnja električne energije raspodjelila se prema distribucijskoj krivulji koja se unosi u EnergyPLAN. Može se odrediti potrošnja električne energije za transport (punjenje baterije EV), kako je i uzeto u radu, ili u neku drugu svrhu, a određuje se unošenjem ulaznih podataka u prozor "*Transport*" u EnergyPLAN-u. Električna energija u transportu se može fleksibilno rasporediti na dva načina. Jedan obuhvaća pametno punjenje i mogućnosti za V2G koji se definiraju u prozoru za transport, dok drugi obuhvaća značajke fleksibilne potrošnje.

Jedan dio potrošnje električne energije može se rasporediti prema fleksibilnoj potrošnji u kratkim periodima prema sljedeće četiri kategorije:

1. Potrošnja prati definiranu satnu distribucijsku krivulju (baterije EV se pune tijekom noći).
2. Potrošnja je nezavisno raspoređena prema stvarnoj ravnoteži električne energije u razdoblju od 24 sata,  $D_{FXDay}$ , (TWh/god.). (Slično je prethodno navedenom, samo što se ovdje dodaje mogućnost koncentriranja potrošnje električne energije u satima visoke proizvodnje, na primjer proizvodnja iz vjetra).
3. Potrošnja se može nezavisno rasporediti prema stvarnoj ravnoteži električne energije i kroz razdoblje od jednog tjedna,  $D_{FXWeek}$ , (TWh/god.), (slično prethodno navedenom – značajno za potrošače s dodatnim kapacitetom baterije).
4. Potrošnja koja se može nezavisno rasporediti u razdoblju od četiri tjedna,  $D_{FX4Week}$ , (TWh/god.). (Optimalna distribucija potrošnje za ovaj period zahtjeva dugoročne prognoze uravnoteženja električne energije koja se prenosi do potrošača. Ovakvo prognoziranje je danas teško moguće, zbog toga što se ono temelji na vremenskoj prognozi, a prognoze za period od četiri tjedna trenutno nisu pouzdane).



Pri primjeni fleksibilnog punjenja EV za Dubrovačku regiju koristila se fleksibilna potrošnja u razdoblju od 24 sata. Za kategorije 2, 3 i 4, potrošnja se raspodjeljuje u danim intervalima, jedan za drugim, prema procjeni ravnoteže između "fiksne" proizvodnje i potrošnje električne energije [47]. Proračun proizvodnje i potrošnje izvodi se prema sljedećim formulama, u kojima su u obzir uzeti samo oni faktori koji će biti uzeti u obzir pri proračunu scenarija. Proračun računa vrijednosti posebno za svaki sat kroz cijelu godinu.

Ukupna potrošnja računa se kao suma ostalih potrošnji:

$$d_{Total} = d_E + d_{FX} + d_{BEV} + d_{V2G} \quad (14)$$

Ukupna proizvodnja energije obuhvaća samo proizvodnju iz OIE i računa se prema:

$$e_{Total} = e_{Res} = e_{Res1} + e_{Res2} + e_{Res3} \quad (15)$$

Razlika između potrošnje i proizvodnje predstavlja višak ili manjak u proizvodnji električne energije, ovisno o tome da li se u određenom satu za koji se računa, proizvede više ili manje energije nego što je potrebno:

$$e_{PP} = d_{Total} - e_{Total} \quad (16)$$

Distribucija potrošnje raspoređena je unutar intervala koji se proteže između dva ograničenja:

- a) Uvijek mora biti pozitivna
- b) Treba biti niža od zadanog maksimuma,  $C_{FX}$  (definiran na ulazu)

Određivanje granica varijacija osigurava da prosječna potrošnja perioda odgovara prosječnoj godišnjoj potrošnji [47].

### 6.1.3. Podaci o EV i potrošnja električne energije za punjenje EV

Podaci o karakteristikama baterije EV i potrošnji električne energije za njihovo punjenje unose se u prozor "Transport" u EnergyPLAN-u. Prozor u EnergyPLAN-u s ulaznim podacima za promet služi opisu mogućih promjena u prometnom sektoru. Za proračun su bitni samo podaci o EV označeni narančastom i zelenom bojom [Slika 39]. U prethodnom tekstu date su karakteristike tri vrste baterija pa s obzirom da se u EnergyPLAN podaci o bateriji unose kao podatak za jednu veliku bateriju koja obuhvaća sva vozila, uzeto je da sve vozila imaju kapacitet baterije srednjeg tipa vozila iz [Tablica 5].

Frontpage | Input | Cost | Regulation | Output | Settings

ElectricityDemand | DistrictHeating | RenewableEnergy | ElecStorage | Cooling | Individual | Industry | Transport | Waste | Biomass Co

### Transport:

Help to design inputs

| TWh/year           | Fossil                         | Biofuel **) | Waste ****) | SyntheticFuel ****) | Total |
|--------------------|--------------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------|
| JP (Jet Fuel)      | <input type="text" value="0"/> | 0,00        |             | 0,00                | 0,00  |
| Diesel             | <input type="text" value="0"/> | 0,00        | 0,00        | 0,00                | 0,00  |
| Petrol             | <input type="text" value="0"/> | 0,00        |             | 0,00                | 0,00  |
| Ngas *) (Grid Gas) | <input type="text" value="0"/> |             |             |                     | 0,00  |
| LPG                | <input type="text" value="0"/> |             |             |                     | 0,00  |

|                                |                                |        |                    |
|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------------------|
| H2 (Produced by Electrolysers) | <input type="text" value="0"/> | Change | Hour_transport.txt |
| Electricity (Dump Charge)      | <input type="text" value="0"/> | Change | Hour_transport.txt |
| Electricity (Smart Charge)     | <input type="text" value="0"/> | Change | Hour_transport.txt |

|                     |   |                                  |     |
|---------------------|---|----------------------------------|-----|
| EV (smart) details: | Max. share of cars during peak demand:  | <input type="text" value="0,2"/> |     |
|                     | Capacity of grid to battery connection: | <input type="text" value="0"/>   | MW  |
|                     | Share of parked cars grid connected:    | <input type="text" value="0,7"/> |     |
|                     | Efficiency (grid to battery)            | <input type="text" value="0,9"/> |     |
| V2G details:        | Battery storage capacity                | <input type="text" value="0"/>   | GWh |
|                     | Capacity of battery to grid connection  | <input type="text" value="0"/>   | MW  |
|                     | Efficiency (battery to grid)            | <input type="text" value="0,9"/> |     |

Slika 39. Unos podataka o karakteristikama baterije EV i potrošnji električne energije za njihovo punjenje

U prozoru "Transport" postoji serija ulaznih podataka koji određuju karakteristike baterije EV. EV su podijeljena, s obzirom na način punjenja, na neregulirana (neregulirano punjenje ili "Dump Charge") i pametna vozila (pametno punjenje ili "Smart Charge"). U slučaju nereguliranog punjenja, ulazni podatak određen je potrošnjom električne energije u prometu prikazanom podatkom o vrijednosti ukupne godišnje potrošnje,  $D_{BEV}$ , (TWh/god.) i satnom distribucijskom krivuljom potrošnje električne energije, označenom narančastom bojom na slici. U slučaju pametnog punjenja, uz satnu distribucijsku krivulju potrošnje i vrijednost ukupne godišnje potrošnje,  $D_{V2G}$ , (TWh/god.), sadrži i podatke za regulaciju pa je potrebno odrediti nekoliko bitnih ulaznih podataka, označenih zelenom bojom.

Svi ulazi podaci dati su za cjelokupni sustav opskrbe koji se analizira i za cjelokupni vozni park zajedno sa svim uslugama transportnog sustava unutar sustava opskrbe. Tako je, na primjer, maksimalno opterećenje sustava,  $C_{Charger}$ , izračunato na temelju maksimalne snage jednog vozila i pomnoženo s maksimalnim brojem vozila koja su priključena na mrežu u bilo kojem vremenu.

Jedan važan ulazni podatak je distribucija satne krivulje potrošnje u transportu ( $\delta_{V2G}$ ) koja se koristi u dvije svrhe. Jedna je za određivanje broja V2G vozila koji su u vožnji u satu koji se računa i nisu spojeni na mrežu.

Taj podatak, zajedno s  $V2G_{MaxShare}$  (maksimalni udio vozila u vožnji u satu vršne potrošnje) i  $V2G_{Connection-Share}$ , određuje raspodjelu V2G voznog parka koji je na raspolaganju energetskom sustavu u bilo kojem satu. Druga svrha definiranja  $\delta_{V2G}$  je određivanje pražnjenja baterije uslijed vožnje [47].

#### 6.1.3.1. Proračuni početnih ulaznih podataka

Satna krivulja potrošnje u transportu, a time i pražnjenje baterije ( $t_{V2G}$ ) računa se na sljedeći način:

$$t_{V2G} = \left[ D_{V2G} \cdot \delta_{V2G} / \sum \delta_{V2G} \right] \cdot \eta_{CHARGE} \quad (17)$$

Opterećenje priključka ukupnog V2G voznog parka na mrežu na satnoj osnovi ( $c_{V2G}$ ) računa se:

$$c_{V2G} = C_{Charger} \cdot V2G_{Connection-Share} \cdot \left( (1 - V2G_{MaxShare}) + V2G_{MaxShare} \cdot (1 - \delta_{V2G} / \text{Max}(\delta_{V2G})) \right) \quad (18)$$

Formula se sastoji od tri faktora. Prvi faktor je  $C_{Charger}$ , snaga ukupnog V2G voznog parka. Pomnožen je s  $V2G_{Connection-Share}$ , udio parkiranih vozila za koje se pretpostavlja da će biti priključeni na mrežu. Treći faktor, u zagradama, računa udio vozila u vožnji u svakom satu. Treći faktor temelji se na zbroju dva uvjeta. Prvi uvjet,  $(1 - V2G_{MaxShare})$ , predstavlja minimalni udio parkiranih vozila. Drugi uvjet predstavlja dodatni udio vozila koji su parkirani za vrijeme niskog opterećenja prometa. Udio parkiranih vozila u satu poznat je iz ulaznog podatka iz satne krivulje potrošnje električne energije voznog parka. Ova formula računa  $c_{V2G}$ , opterećenje svih priključenih V2G vozila, u bilo kojem satu. Formula računa opterećenje, ne uzimajući u obzir je li dovoljna dostupna snaga baterije. To će se uzeti u obzir u daljnjem proračunu.

Raspoloživa snaga raspodijeljena je između vršne potrošnje tijekom najvećeg opterećenja. Ova potrošnja odnosi se na potrošnju baterije, a ne na potrošnju električne energije sustava, jer su vozila nužno isključena s mreže dok su u vožnji. Proračun raspoloživog priključka na mrežu ovisi o definiciji oba udjela, maksimalnog udjela V2G vozila,  $V2G_{MaxShare}$  i udjela parkiranih vozila koja su priključena na mrežu,  $V2G_{Connection-Share}$  [47].

### 6.1.3.2. Razmatranje modeliranja baterije i punjenje prije isključenja

Baterije V2G voznog parka modelirane su kao jedna "velika baterija" za cijeli vozni park. Raspoloživa snaga baterije jednaka je maksimalnom opterećenju. U stvarnosti, ukupno opterećenje baterije nije raspoloživo cijelo vrijeme, zbog toga što će neka vozila biti u vožnji i ne mogu se niti prazniti niti puniti s mreže; ostala vozila će morati voziti tijekom sljedećih nekoliko sati i zbog toga se neće moći prazniti. U svakom slučaju, zbog jednostavnosti, model pretpostavlja da je baterija u potpunosti napunjena kada se vozilo isključi s mreže i krene u vožnju. Od modela se zahtijeva da osigura da je svako pojedinačno vozilo potpuno napunjeno prije isključivanja. Općenito, baterija je puna u slučaju viška proizvodnje električne energije. Međutim, kada nema viška proizvodnje energije, model mora osigurati da je baterija napunjena prije voznog ciklusa.

Model pretpostavlja da je raspored vožnje svakog vozila 100% ispravan u uvjetima određivanja kada će vozač trebati ponovno koristiti vozilo za vožnju. Zbog toga se u rasporedu pretpostavlja da će se prvo puniti vozila koja će se ponovno voziti u sljedećim satima pa ako postoji i mala proizvodnja iz vjetra, usmjerena je na vozila koja će se koristiti u nadolazećem vremenu. To jest, tijekom svakog sata, model ispituje sljedeći, na primjer, ispituje potrebe vožnje za dva sata i ako baterija nije dovoljno napunjena za to vrijeme, onda prisilno puni bateriju i u slučaju nedostatka viška proizvodnje.

Takva procedura simulira situaciju u kojoj će svaki vozač pojedinačno određivati prioritete u pogledu optimizacije između punjenja s niskim troškom i sigurnosti napunjene baterije prije početka vožnje. Vlasnik vozila će to odrediti na način da odredi cijene i ograničenja na kompjuterskom sustavu regulacije vozila. Dakako, vozač će s vremenom iz iskustva naučiti i znati kako to optimizirati. Također će znati koliko sati prije mora početi puniti bateriju u slučaju punjenja u vrijeme više cijene energije.

U ovom slučaju, model sam određuje broj sati koji su potrebni za sigurnu vožnju, a s tim i minimalno potrebno punjenje koje treba zadovoljiti. Potreban broj sati ovisit će o obliku i modelu distribucije krivulje potrošnje kao i o definiranju ostalog dijela energetskeg sustava. Na primjer, sustav u kojem je značajna količina viška proizvodnje zahtijevat će manje ponovnog punjenja (baterije će se puniti do kraja), nego sustav u kojem je višak proizvodnje nizak.

Potrebni sati za ponovno punjenje traže se na temelju pokušaja i pogreške. Model pokreće proračun osiguravajući da je zadovoljeno minimalno potrebno punjenje baterije kako bi osiguralo vožnju za narednih nekoliko sati i ako to rezultira manjkom napunjenosti baterije, broj se podiže na dva i tako dalje. Broj sati postaje rezultat proračuna. U optimiziranom sustavu kontrole električne energije, broj sati koji su prioritet za vožnju, može također biti određen pomoću vremenske prognoze s obzirom na predviđeni vjetar za sljedećih nekoliko sati, ali se taj odnos ovdje ne uzima u obzir [47].

### 6.1.3.3. Modeliranje V2G vozila

Model izvodi proračun za svaki sat. V2G vozila su određena da se pune u vrijeme dostupnog viška proizvodnje električne energije ( $c_{CEEP}$ ) i raspoloživog kapaciteta baterije ( $S_{V2G-Battery} - S_{V2G-Battery}$ ) unutar granica opterećenja priključka na mrežu ( $c_{V2G}$ ) za svaki određeni sat.

Stoga formula koristi minimum sve tri vrijednosti:

$$e_{Charge} = \min[c_{CEEP}, S_{V2G-Battery} - S_{V2G-Battery}/\mu_{Charge}, c_{V2G}] \quad (19)$$

Između ostalog, kako je prethodno spomenuto, punjenje je prisilno u slučaju kada trenutna potrošnja energije u transportu i u sljedećim "y" satima ne može biti zadovoljena sa sadržajem baterije. U početku, "y" vrijednost je postavljena za jedan sat. Ako to dovede do manjka količine energije u bateriji, vrijednost se povećava u koracima od jednog sata.

Minimalna količina energije u bateriji računa se:

$$S_{V2G-Battery-min} = \sum_{x=a}^{a+y} t_{V2G} \quad (20)$$

Prema tome je punjenje baterije postavljeno na način da zahtjeva:

$$e_{Charge} \geq [S_{V2G-Battery} - S_{V2G-Battery-min}]/\mu_{Charge} \quad (21)$$

Ako  $e_{Charge}$  bude veće od vrijednosti opterećenja priključka na mrežu,  $c_{V2G}$ , broj sati, y, se poveća za jedan i računanje se ponovno pokreće. Novi sadržaj baterije se računa dodavanjem gore izračunatog punjenja i umanjuje za pražnjenje uzrokovano vožnjom ( $t_{V2G}$ ):

$$S_{V2G-Battery} = S_{V2G-Battery} - t_{V2G} + (e_{Charge}/\mu_{Charge}) \quad (22)$$

V2G vozila opskrbljuju mrežu u slučaju moguće zamjene proizvodnje iz elektrana ( $e_{PP}$ ) i kao dostupna energija u baterijama koja se pohranjuje nakon zadovoljenja potrošnje energije tijekom vožnje:

$$e_{Inv} = \min \left[ e_{PP}, \left( (S_{V2G-Battery} - S_{V2G-Battery-min}) \cdot \mu_{Inv} \right), C_{V2G} \right] \quad (23)$$

Rezultat novog sadržaja baterije se računa na sljedeći način:

$$S_{V2G-Battery} = S_{V2G-Battery} - (e_{Inv} / \mu_{Inv}) \quad (24)$$

Zbog razlika u sadržaju baterije na početku i na kraju perioda proračuna (jedna godina), mogu se pojaviti greške u proračunu. Da bi se one ispravile, gornja formula se ponavlja sve dok sadržaj spremnika na kraju bude jednak onom na početku. U početku, spremnik je definiran s 50% kapaciteta spremnika baterije. Nakon prvog proračuna određen je novi početni sadržaj definiran rezultatom sadržaja na kraju proračuna. Procedura se ponavlja dok razlika postane neznatna [47], [50], [5].

## 6.2. Modeli punjenja EV

Postojeće infrastrukture distribucije električne energije postavljaju određena ograničenja na uvođenje velikog broja EV u EES. Ako u sustav nije uključena regulacija, punjenje EV može utjecati na povećanje vršnog opterećenja satne krivulje potrošnje električne energije, čak i u slučaju kada je godišnja potrošnja za punjenje električnih vozila niska, na primjer nekoliko tisuća kW [51]. Model punjenja EV bez regulacije u sustavu naziva se neregulirano punjenje i bazirano je isključivo na potrebama i navikama vozača. Predstavlja jedan od modela punjenja koji će se analizirati u EnergyPLAN-u.

Do sada su se razmatrale i druge dodatne tehnologije koje uključuju modele punjenja uz regulaciju punjenja kao što je fleksibilna potrošnja električne energije za punjenje. Regulacija potrošnje bazira se na punjenju EV za vrijeme niske potrošnje električne energije, u noćnim satima, i za vrijeme vršne proizvodnje iz intermitentnih izvora energije [52], [53]. Fleksibilni model potrošnje također se razmatrao kao jedan od modela korišten u EnergyPLAN-u.

Distribucija punjenja EV podudara se s distribucijom potrošnje električne energije i vršnim opterećenjima. Razvijanje komunikacijskih tehnologija između EV i infrastrukture energetskog sustava može prebaciti punjenje u vrijeme niske potrošnje električne energije [54]. EV se mogu koordinirati na način da njihovo punjenje bude regulirano pa osim fleksibilne potrošnje razvijeno je i takozvano pametno punjenje.

Ono osigurava regulaciju EES-a i kompenzira proizvodnju iz OIE s distribucijom potrošnje. Kroz pametno punjenje EV mogu na efikasan način doprinijeti radu mreže zahvaljujući brzom odzivu na potrebe energetskog sustava i očekivanom rastu broja EV u budućnosti.

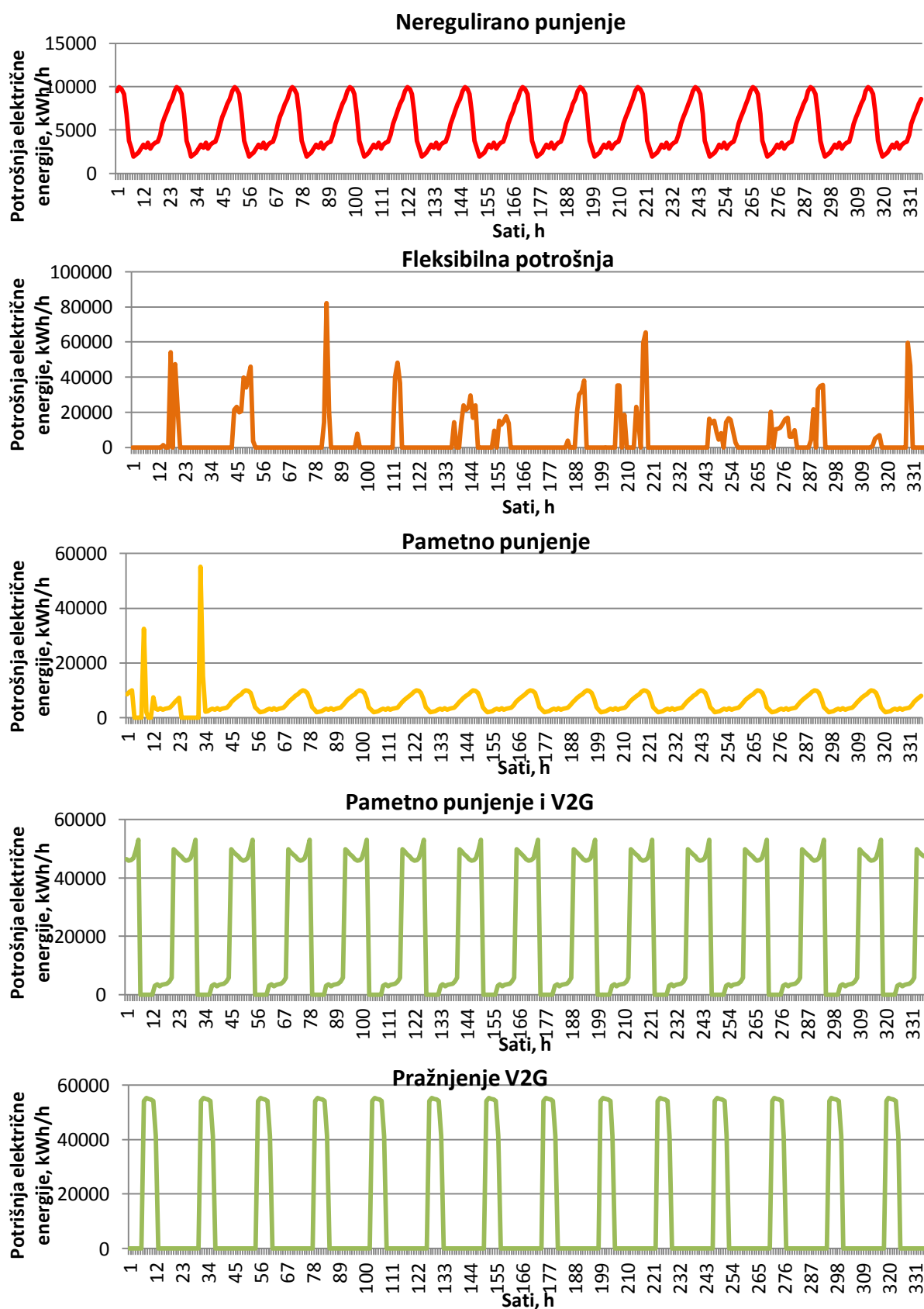
Osim što pametno punjenje uvjetuje punjenje EV za vrijeme niske potrošnje, ono isto tako uključuje i kontrolu punjenja svakog pojedinog vozila u cilju zadovoljenja potreba vozača za punjenjem vozila u određeno vrijeme i kontrolu za potrebe mreže u cilju osiguravanja regulacije i izbjegavanje preopterećenja mreže [55]. Model pametnog punjenja je treći model koji se analizirao u planiranju energetskeg sustava za područje Dubrovnika.

Mreža može imati dva načina distribucije energije, jednosmjerni i višesmjerni energetski tok. Usluge koje zadovoljavaju jednosmjerni energetski tok distribucije energije iz mreže za punjenje EV odnose se na model pametnog punjenja [56]. S druge strane, usluge koje zadovoljavaju višesmjerne tokove distribucije, iz mreže za EV i od EV prema mreži, nazivaju se vozila-na-mreži (V2G). V2G su jedna od mnogih tehnologija u energetici koja ide u prilog pohrani električne energije u spremnike. Koriste energiju iz mreže za vlastiti pogon, a isto tako služe snabdijevanju mreže električnom energijom koje se dijelom kontrolira na način da zadovolje potrebe energetskeg sustava. V2G tehnologija pruža rješenja obje vrste toka energije. Baterije V2G vozila se pune za vrijeme niske potrošnje i prazne za vrijeme manjka proizvodnje električne energije u sustavu. Svako vozilo treba obuhvaćati tri osnovna elementa:

- priključak na mrežu za ostvarivanje energetskeg toka,
- kontrola i komunikacijska veza s operatorom distribucijskeg sustava,
- upravljačku ploču u vozilu za mjerenje snage vozila.

Kontrola sustava upravljanja vozilom mora dopustiti operatoru distribucijskeg sustava preuzimanje dijela kontrole, s tim da vozila uvijek u većoj mjeri sudjeluju u kontroli punjenja i pražnjenja u cilju smanjenja istrošenosti baterije vozila i pripreme vozila za vožnju. Drugim riječima, vozilo uvijek treba biti na raspolaganju za vozača kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost za svako zasebno vozilo, dok se pouzdanost električne mreže osigurava kroz veliki broj vozila. Ispitivanja i analize su se provodile na raznim modelima [57], [58]. Kako bi se procijenila učinkovitost V2G tehnologija u integraciji s proizvodnjom energije iz OIE, potrebne su detaljne simulacije izrađene za svaki sat [9]. Takva vrsta analize izrađena je u EnergyPLAN-u za Dubrovačku regiju.

Ispitivanjem sva četiri modela punjenja EV u programu EnergyPLAN za područje Dubrovačke regije dobile su se satne krivulje potrošnje električne energije u transportu za svaki od modela. Prikaz distribucije potrošnje dat je na [Slika 40] za razdoblje od dva tjedna u mjesecu siječnju.



Slika 40. Krivulje potrošnje električne energije u transportu za sve obrađene modele punjenja EV



Iz priloženih dijagrama da se zaključiti da neregulirano punjenje prati krivulju satne distribucije potrošnje za punjenje EV, koja je prethodno u radu proračunata i unešena u EnergyPLAN. Ono ne uključuje niti jedan oblik regulacije punjenja.

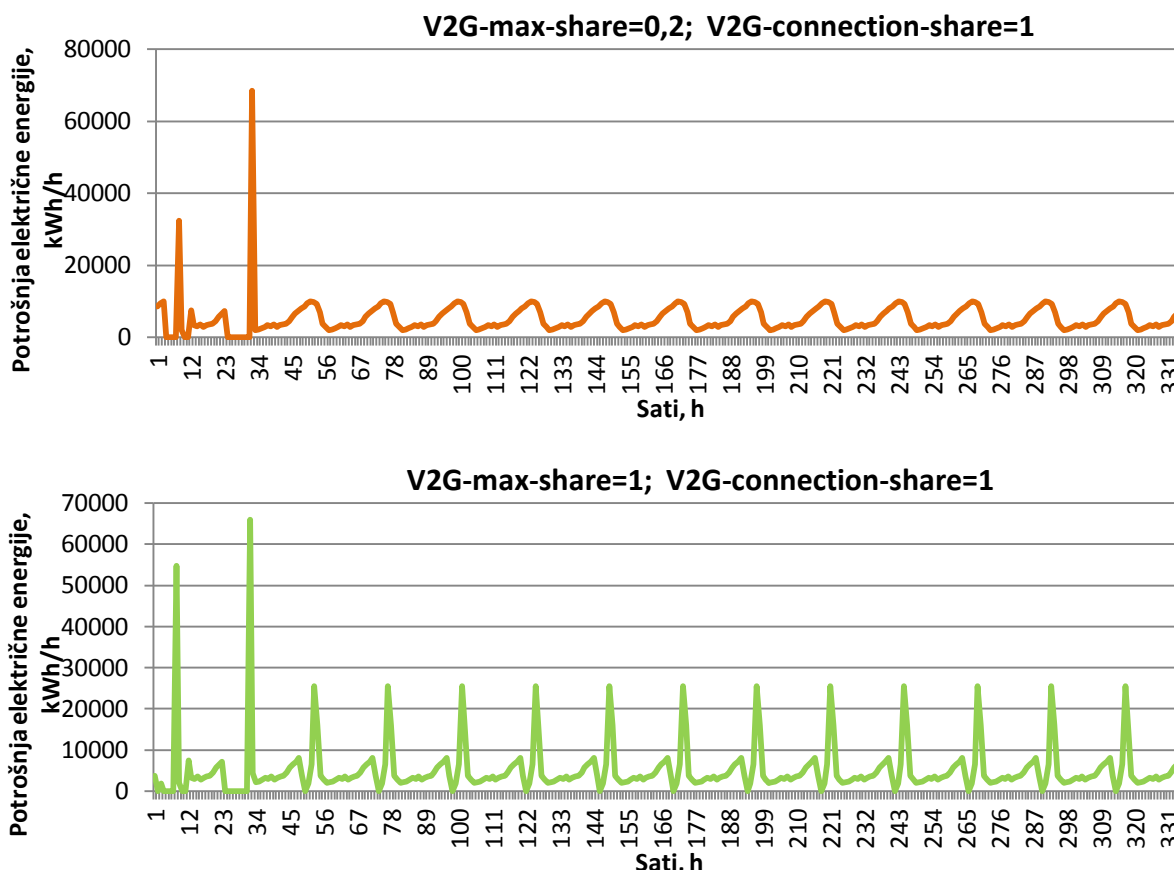
Kao što je već prije objašnjeno, fleksibilna potrošnja regulira se u cilju smanjenja vršne proizvodnje iz OIE i koncentrira potrošnju električne energije za punjenje EV u razdoblju niske potrošnje, odnosno noćnih sati. Za razliku od nereguliranog punjenja, fleksibilna potrošnja ima neujednačenu distribuciju zbog intermitentnosti OIE.

Pametno punjenje regulira potrošnju na sličan način kao i fleksibilno, ali uz zadovoljavanje potreba mreže nastoji zadovoljiti i potrebe potrošača. Moglo bi se reći da pametno punjenje sadrži značajke nereguliranog punjenja, jer prati potrebe vozača za vožnjom i značajke fleksibilne regulacije koja regulira potrošnju u korist proizvodnje kako bi smanjila višak proizvodnje te daje dodatne mogućnosti u regulaciji veze između potreba sustava i EV.

Posljednji model uz pametno punjenje uključuje i model V2G vozila. Ovaj tip, uz pametnu potrošnju osigurava i snabdijevanje sustava električnom energijom u vrijeme manjka proizvodnje. Prikazana je krivulja potrošnje za punjenje i pražnjenje V2G. Vidimo da u obje krivulje ima malih varijacija u distribuciji. Ovaj model zadovoljava dva energetska toka, predavanje električne energije iz mreže za V2G vozilima i predavanje energije od vozila prema mreži, u cilju osiguravanja potreba kako potrošača tako i sustava.

Promatrao se i odnos udjela vozila u prometu i kako utječe na satnu distribuciju potrošnje kod pametnog punjenje. Proračun raspoloživog priključka na mrežu ovisi o definiciji oba udjela, maksimalnog udjela V2G vozila,  $V2G_{Max-Share}$  i udjela parkiranih vozila koja su priključena na mrežu,  $V2G_{Connection-Share}$ . Postotak vozila u vožnji,  $V2G_{Max-Share}$ , i postotak parkiranih vozila  $V2G_{Connection-Share}$ , zadaje se u prozoru "Transport". Zadavanjem vrijednosti  $V2G_{Max-Share}$ , može se odrediti koliko je vozila parkirano i potencijalno priključeno na mrežu tijekom vršne potrošnje. Za proračun scenarija,  $V2G_{Max-Share}$  je definiran s 20%, što predstavlja karakterističnu situaciju u kojoj je minimalno 80% svih vozila parkirano tijekom maksimalnog opterećenja prometa. Ulazni podatak za udio parkiranih vozila priključenih na mrežu u vrijeme niskog opterećenja prometa,  $V2G_{Connection-Share}$ , iznosio je 70%, a distribucija krivulje potrošnje prikazana je na trećem dijagramu na [Slika 40]. Ako su oba 100%, model pretpostavlja da su sva vozila u vožnji tijekom vršne potrošnje i uslijed toga je priključak na mrežu nula. Tijekom niske potrošnje, bit će jednak maksimumu priključka na mrežu,  $C_{Charger}$ , oduzimajući nekoliko vozila koja su u vožnji.

Čak i kod vršne potrošnje (najvećeg opterećenja prometa), model ne pretpostavlja da su sva vozila u vožnji. Analizirale su se još dvije pretpostavke postotka raspoloživog priključka i to kada je  $V2G_{Max-share}$  iznosio 20%, a  $V2G_{Connection-share}$  100%, i kada su oba iznosila 100% [9]. Dijagrami distribucije krivulja s obzirom na postotak raspoloživog priključka EV određenim s dvije navedene pretpostavke prikazani su na [Slika 41] za razdoblje od dva tjedna u mjesecu siječnju.



Slika 41. Dijagrami satne distribucije krivulje potrošnje s obzirom na postotak raspoloživog priključka EV

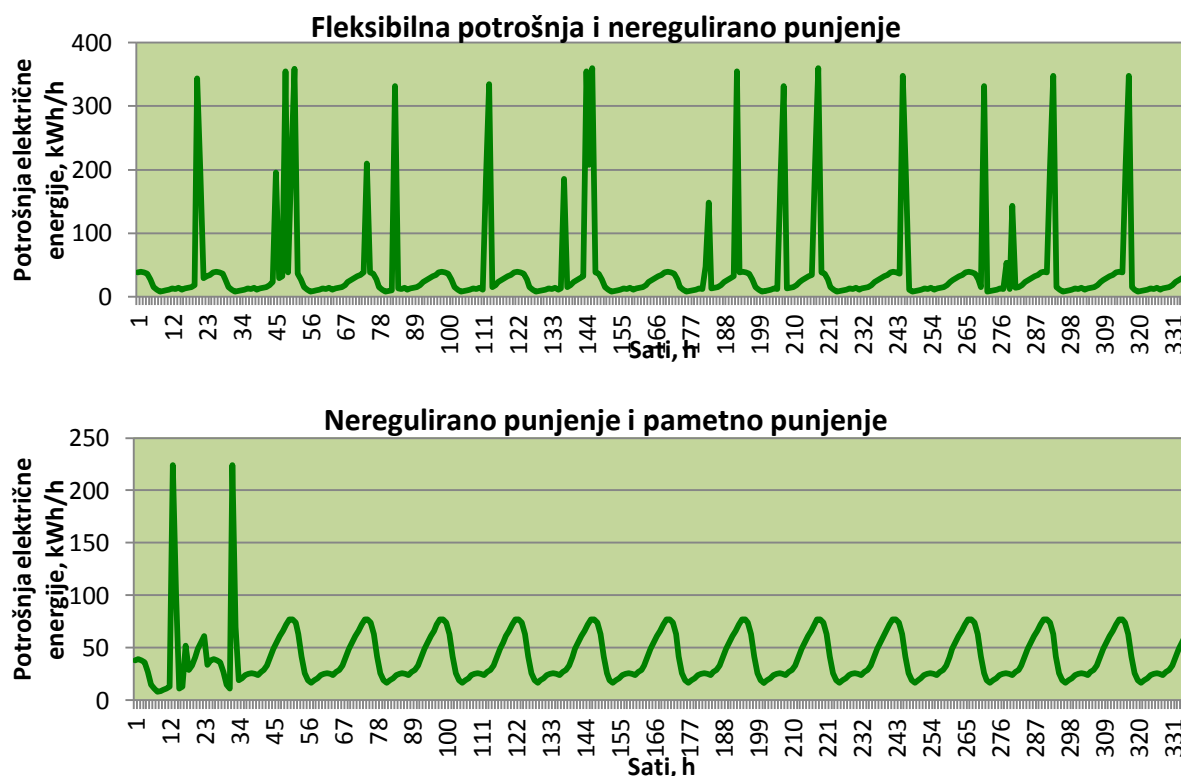
Iz prikazanih dijagrama da se zaključiti da je punjenje većeg broja EV u isto vrijeme učestalije ako je maksimalni udio vozila u vožnji 100%, za razliku od situacije u kojoj je maksimalni udio vozila 20%. Punjenje EV odvija se češće zbog pretpostavke da  $V2G_{Max-share}$  iznosi 100% što označava učestalu upotrebu vozila u vožnji, a i broj vozila koji su priključeni na mrežu u vrijeme niskog opterećenja prometa,  $V2G_{Connection-share}$ , je također 100% što omogućuje da se sva vozila pune u isto vrijeme.

## 7. REZULTATI SIMULACIJA U EnergyPLAN-u

S obzirom na postojeće modele punjenja EV, odabrali su se modeli punjenja za svaki od scenarija do 2050.. Iz dobivenih rezultata, njihovom analizom utvrdio se utjecaj svakog od modela na krivulju potrošnje električne energije i utjecaj na proizvodnju iz OIE te su se dale usporedbe za svaki pojedini scenarij. Utjecaj EV na satnu krivulju potrošnje provjeravao se s obzirom na povećanje maksimalne vršne godišnje potrošnje uslijed punjenja EV. Utjecaj modela na proizvodnju električne energije iz OIE provjeravao se s obzirom na povećanje "kritičnog viška proizvodnje električne energije" (CEEP) koji označava višak proizvedene energije namijenjen izvozu, a prelazi granice opterećenja u kojima se iznos izvoza može kretati. U proračunu nisu postavljene granice do koje vrijednosti se može kretati prijenos energije na susjedna energetska tržišta, nego se samo pratilo povećanje CEEP i sustav je postavljen kao izolirani sustav.

### 7.1. Rezultati scenarija za 2020. godinu

Za izradu simulacije scenarija bilo je potrebno u EnergyPLAN unijeti ulazne podatke o potrošnji i proizvodnji električne energije s određenim kapacitetima potrošnje i instaliranim snagama postrojenja za proizvodnju s karakterističnim godišnjim distribucijskim krivuljama kako je to bilo opisano u prethodnom tekstu. U prozoru za "Transport" unijeli su se i ulazni podaci koju opisuju karakteristike baterije EV s odgovarajućom godišnjom distribucijskom krivuljom potrošnje električne energije za punjenje EV. Simulacija u EnergyPLAN-u rađena je za dvije pretpostavke. Prva pretpostavka obuhvaća model nereguliranog punjenja i fleksibilne potrošnje u transportu za 2020. godinu. Smatra se da će u 2020. dio, tek 50% potrošnje, biti fleksibilno regulirano, dok će se ostalih 50% vozila voznog parka puniti prema nereguliranom punjenju jer tehnologije regulacije neće biti u potpunosti zastupljene u transportu u bližoj budućnosti. Druga pretpostavka zamjenjuje fleksibilnu potrošnju s pametnim punjenjem i uzima se u obzir da će se 50% vozila puniti regulacijom pametnog punjenja, a ostalih 50% nereguliranim punjenjem. Prikaz distribucije potrošnje za oba modela dat je u dijagramima na [Slika 42] za razdoblje od dva tjedna u mjesecu siječnju. Dat je samo prikaz potrošnje električne energije za punjenje EV, ali ne i utjecaj na distribucijsku krivulju potrošnje, jer je on jako mal s obzirom na distribucijsku krivulju.



Slika 42. Distribucija krivulje potrošnje za pretpostavljena dva modela punjenja EV u 2020. godini

Dio potrošnje bazira se na nereguliranom punjenju, a drugi dio se regulira. Fleksibilna potrošnja prati proizvodnju iz obnovljivih izvora, što se da zaključiti iz dijagrama s obzirom da je potrošnja učestalo visoka u usporedbi s nereguliranim punjenjem kombinirano s pametnim.

Utjecaj na vršna opterećenja i na kritični višak proizvedene električne energije svakog pojedinog modela prikazan je u [Tablica 9].

Tablica 9. Utjecaj pretpostavljenih modela punjenja EV na krivulju potrošnje električne energije i na kritični višak proizvedene električne energije u 2020. godini

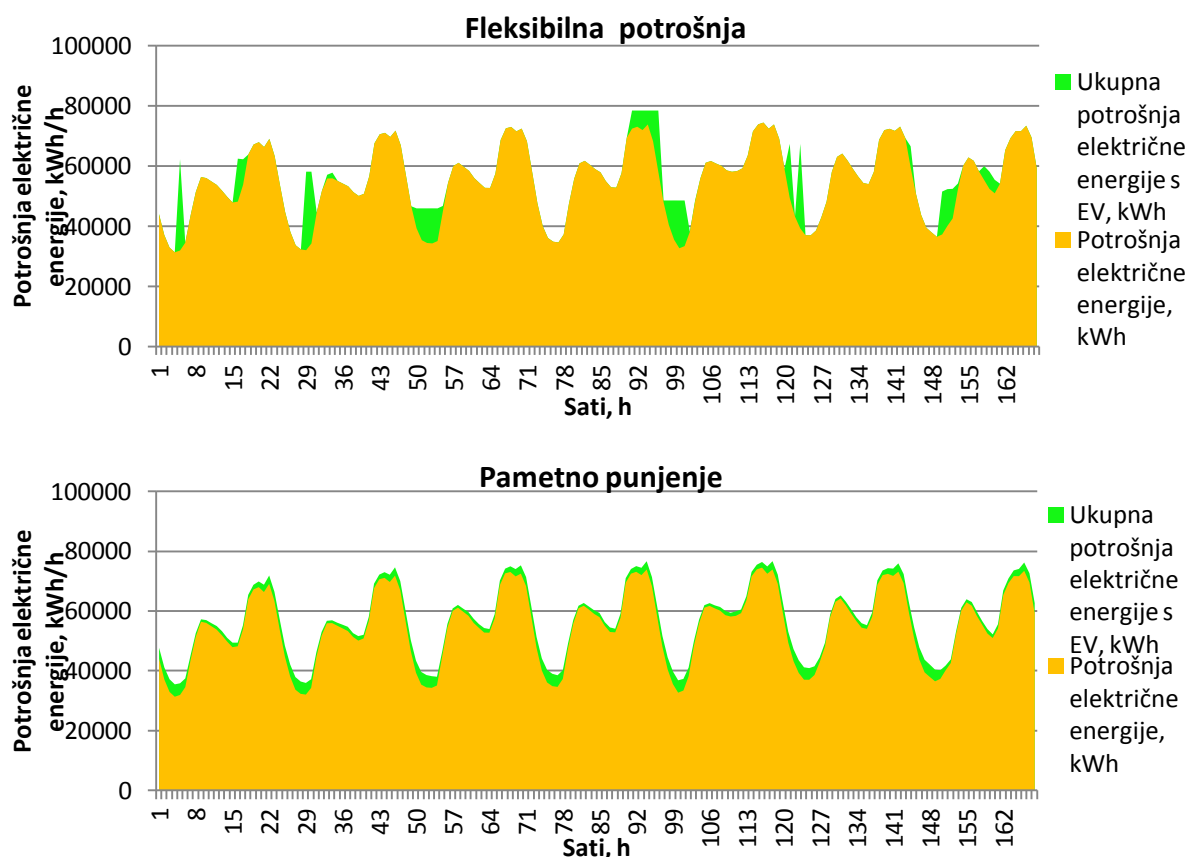
| 2020. GODINA                                     | POVEĆANJE CEEP-a,<br>(GWh/god) | POVEĆANJE<br>MAKSIMALNOG VRŠNOG<br>OPTEREĆENJA, (kWh/h) |
|--|--------------------------------|---|
| PAMETNO I NEREGULIRANO<br>PUNJENJE               | 288,92                         | 18  |
| FLEKSIBILNA POTROŠNJA I<br>NEREGULIRANO PUNJENJE | 288,92                         | 18  |

Na temelju rezultata simulacije modela u EnergyPLAN-u vidi se da nema razlike između dva pretpostavljenja modela.

Osim problema CEEP javlja se i problem uvoza i stabilizacije mreže za određene modele punjenja. Problem stabilizacije mreže rješava se određivanjem postotka kojim sustav djeluje u regulaciji prijenosa energije dalekovodima i za oba modela on je iznosio 13%. Također se smatra da će u 2020. HE Dubrovnik sudjelovati u regulaciji sustava udjelom od 30%. Problem uvoza i izvoza rješavaju se određivanjem opterećenja mreže na dalekovodima. Problem uvoza riješit će se ako se opterećenje postavi na 58 MW za oba modela, dok se problem CEEP rješava postavljanjem te vrijednosti na 100,5 MW.

## 7.2. Rezultati scenarija za 2030. godinu

Za 2030. godinu se smatra da će tehnologije regulacije u potpunosti biti zastupljene u elektroenergetskom sustavu pa su se na temelju toga odredila dva modela koja će se simulirati u EnergyPLAN-u. Jedan model pretpostavlja regulaciju fleksibilnom potrošnjom, dok drugi model pretpostavlja regulaciju pametnim punjenjem. Prikaz odnosa potrošnje električne energije za punjenje EV i satne distribucije potrošnje u razdoblju od sedam dana za mjesec siječanj, dat je na [Slika 43].



Slika 43. Utjecaj punjenja EV na satnu krivulje potrošnje za pretpostavljena dva modela punjenja EV u 2030. godini

U [Tablica 10] su prikazani utjecaji oba modela punjenja EV na CEEP i povećanje vršnog opterećenja satne krivulje potrošnje električne energije.

**Tablica 10. Utjecaj pretpostavljenih modela punjenja EV na krivulju potrošnje električne energije i na kritični višak proizvedene električne energije u 2030. godini**

| 2030. GODINA          | POVEĆANJE CEEP-a,<br>(GWh/god) | POVEĆANJE<br>MAKSIMALNOG VRŠNOG<br>OPTEREĆENJA, (kWh/h) |
|-----------------------|--------------------------------|---|
| PAMETNO PUNJENJE      | 648,86                         | 1400  |
| FLEKSIBILNA POTROŠNJA | 649,21                         | 21496   |

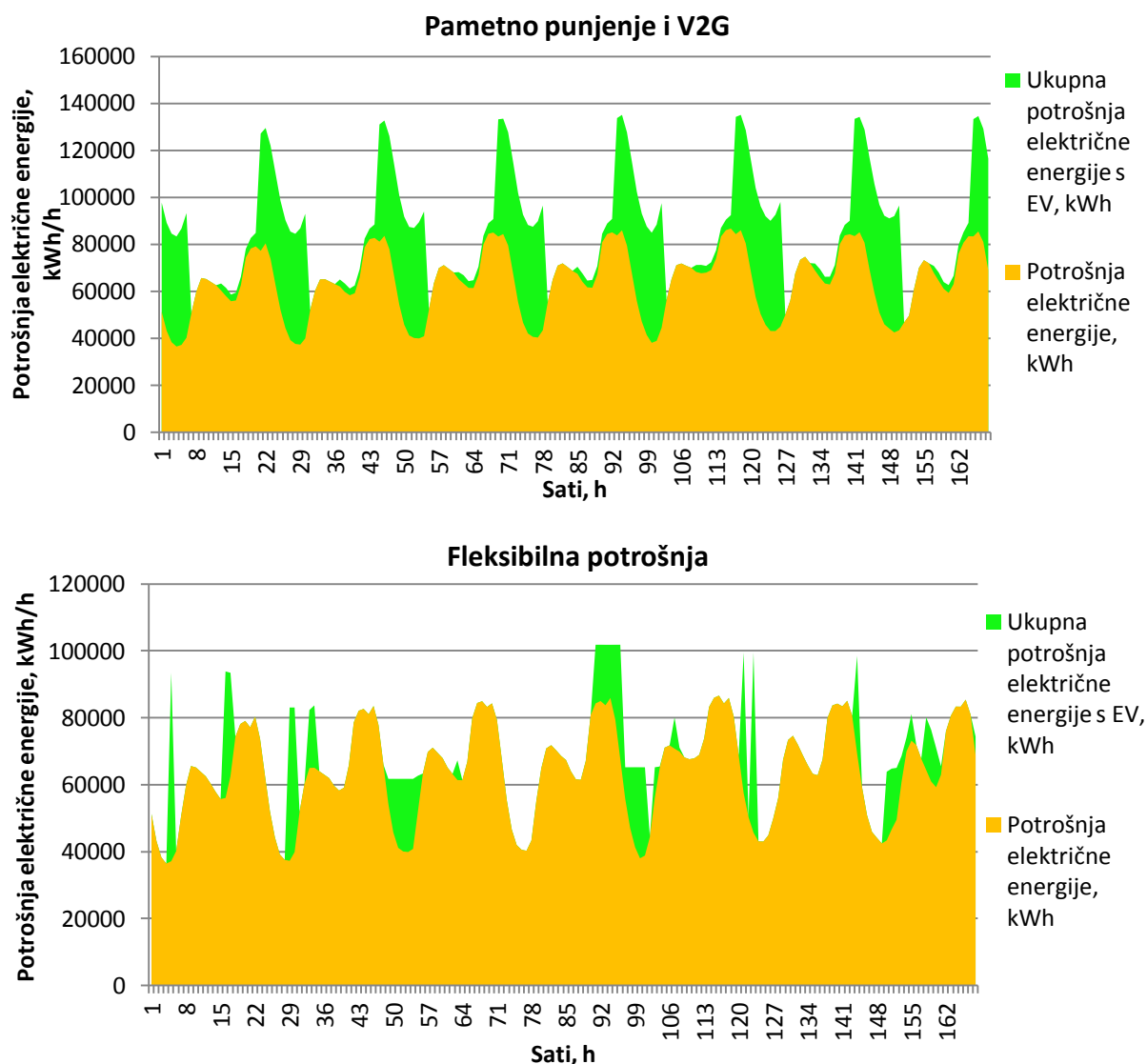
Iz podataka u [Tablica 10], usporedbom oba modela da se zaključiti da pametno punjenje daje bolje rezultate i manje utječe na povećanje vršnog opterećenja, kao i na kritični višak proizvodnje iz OIE.

U ovom scenariju se također javlja problem stabilizacije mreže, kao i problem uvoza uz CEEP. Problem stabilizacije mreže rješava se postavljenjem udjela sustava u regulaciji prijenosnih kapaciteta u iznosu od 25% u slučaju oba modela punjenja. Pretpostavka je da će HE Dubrovnik u 2030. sudjelovati 60% u regulaciji elektroenergetskog sustava. Problem uvoza u modelu pametnog punjenja rješava se određivanjem opterećenja na dalekovodima od 74 MW, dok se CEEP smanji ako se taj iznos poveća na 221 MW. Za model fleksibilne potrošnje te su vrijednosti nešto niže pa za uvoz ona iznosi 68 MW, a za CEEP 223 MW opterećenja.

### 7.3. Rezultati scenarija za 2050. godinu

U scenariju za 2050. godinu smatra se da će tehnologije pametnog punjenja u kombinaciji s V2G vozilima biti u potpunosti razvijene pa su se na temelju toga pretpostavila dva modela za ovaj scenarij. Prva pretpostavka je model s pametnim punjenjem koji uključuje i mogućnosti V2G vozila za snabdijevanje mreže električnom energijom u slučaju nedostatka proizvodnje iz mreže. U ovom modelu, u EnergyPLAN-u je zadana regulacija punjenja u cilju smanjenja troška. Unešena je satna krivulja cijena električne energije u kn/kWh, raspodijeljena prema niskoj i visokoj tarifu, za sve sate u godini. Pametno punjenje i V2G sustav bi trebao trošiti električnu energiju u vrijeme niske cijene električne energije. Kao drugi model pretpostavila se fleksibilna potrošnja električne energije u transportu. Utjecaj oba modela punjenja na satnu krivulju potrošnje prikazana su na [Slika 44] za sedam dana u mjesecu siječnju. Prema dijagramu za pametno punjenje vidi se da se najveća potrošnja odvija tijekom noćnih sati, odnosno poslije 21 sat jer se tada cijena struje računa prema nižoj tarifi.

Ovaj model prilagođava se potrebama vozača, proizvodnji iz OIE u energetske sustavu i prati nisku potrošnju električne energije i u to vrijeme nastoji puniti vozila, dok se s druge strane fleksibilna potrošnja prilagođava proizvodnji iz OIE i nastoji regulirati punjenje vozila u vrijeme niske potrošnje kako je to vidljivo iz dijagrama.



Slika 44. Utjecaj punjenja EV na satnu krivulje potrošnje za pretpostavljena dva modela punjenja EV u 2050. godini

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati utjecaja modela na vršnu potrošnju i kritičnu proizvodnju iz kojih se da zaključiti da model pametnog punjenja s V2G vozilima ima manji utjecaj na vršna opterećenja, ali za razliku od fleksibilne potrošnje povećava CEEP.

**Tablica 11. Utjecaj pretpostavljenih modela punjenja EV na krivulju potrošnje električne energije i na kritični višak proizvedene električne energije u 2050. godini**

| 2050. GODINA           | POVEĆANJE CEEP-a,<br>(GWh/god) | POVEĆANJE<br>MAKSIMALNOG VRŠNOG<br>OPTEREĆENJA, (kWh/h) |
|------------------------|--------------------------------|---|
| PAMETNO PUNJENJE I V2G | 1094,93                        | 47485   |
| FLEKSIBILNA POTROŠNJA  | 1093,77                        | 66486   |

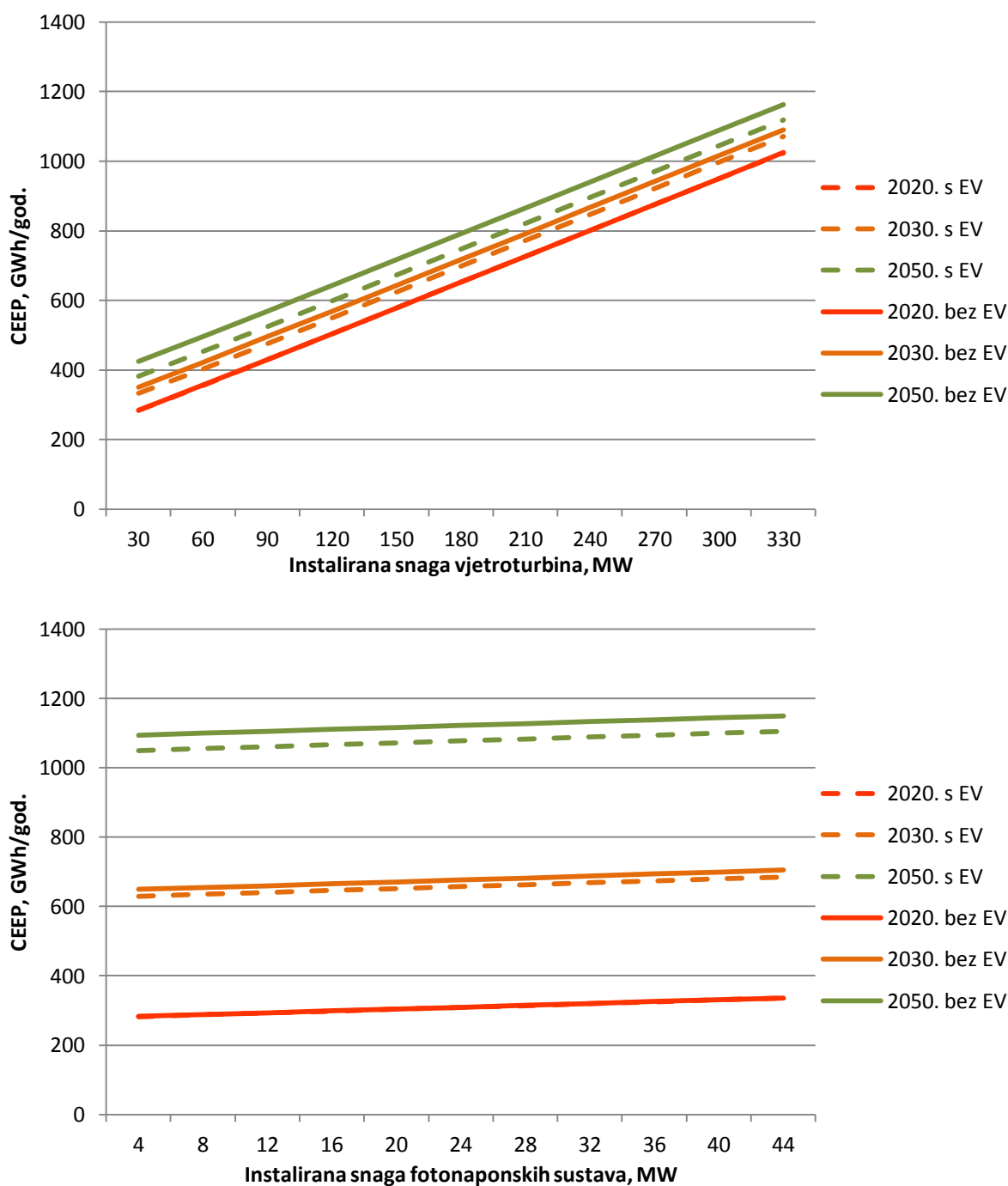
U 2050. se pretpostavlja da HE Dubrovnik, s udjelom od 90%, sudjeluje u regulaciji mreže. Stabilizacija mreže za fleksibilno punjenje u regulaciji sudjeluje s udjelom od 35%, dok za pametno punjenje i V2G vozila je taj postotak manji i iznosi 26%. Međutim, iznos opterećenja mreže na dalekovodima je u modelu pametnog punjenja znatno veći i za uvoz iznosi 128 MW, dok za rješavanje problema CEEP on iznosi 455 MW. Za model fleksibilnog punjenja, problem uvoza se rješava određivanjem opterećenja u iznosu od 79 MW, a CEEP u iznosu od 380 MW. U modelu pametnog punjenja se javlja i problem manjka V2G vozila, što znači da ovakav sustav zahtijeva veću penetraciju EV.

#### 7.4. Utjecaj penetracije EV i OIE na CEEP

U EnergyPLAN-u se provela i dodatna analiza utjecaja penetracije EV na kritični višak godišnje proizvodnje koji se ostvaruje s povećanjem instalirane snage OIE za svaki pojedini scenarij. Odabrani su oni modeli punjenja za koje se prethodnom analizom utvrdilo da imaju manji utjecaj na povećanje kritičnog viška proizvodnje, s tim da je u 2020. odabrano pametno punjenje. U dijagramima na slici prikazan je odnos CEEP i instalirane snage vjetroturbina s obzirom na pretpostavke da u sustavu sudjeluju EV i sustav bez EV, za svaki scenarij. To isto napravljeno je i za instaliranu snagu fotonaponskih sustava. Gornji dijagram na [Slika 45] prikazuje porast CEEP s povećanjem instalirane snage vjetroturbina. Isprekidana linija predstavlja scenarije bez uvođenja EV u energetske sustav i visokom penetracijom proizvodnje iz vjetra, dok puna linija predstavlja sustave s EV za sve proračunate scenarije. Iz dijagrama se da zaključiti da se CEEP u većoj mjeri javlja kod sustava bez električnih vozila, a razlika je najizrazitija u 2050. godini. Donji dijagram prikazuje povećanje CEEP s penetracijom proizvodnje fotonaponskih sustava. CEEP je visok, ali se ne povećava mnogo s povećanjem instalirane snage fotonaponskih sustava, kao što je to slučaj kod penetracije vjetroturbina u energetske sustavu, jer je njihova instalirana snaga manja. Međutim, primjećuje se znatan porast CEEP od jednog scenarija do drugog.



I u ovom slučaju, kao i kod penetracije vjetroturbina, implementacija EV u energetska sustav smanjuje CEEP, što se najviše odražava u 2050. godini.



Slika 45. Povećanje kritičnog višaka proizvodnje s penetracijom OIE u energetska sustavu, usporedba scenarija s EV u sustavu i bez njih

## 8. ZAKLJUČAK

U radu su se promatrala tri scenarija, za 2020., 2030. i 2050. godinu, i njihovom analizom se utvrdilo kakav je utjecaj EV na satnu distribuciju krivulje potrošnje i na proizvodnju energije iz OIE. Radu se pristupilo na dva načina. Prvi pristup obuhvaćao je samo utjecaj potrošnje električne energije za punjenje EV na satnu distribuciju potrošnje električne energije. Analizom se utvrdilo da neregulirano punjenje, koje se temelji na potrebama i navikama vozača, ima negativan utjecaj na satnu krivulju potrošnje iz razloga što se potrošnja za punjenje EV raspodjeljuje prema satnoj distribuciji potrošnje Dubrovačke regije i uzrokuje povećanje vršnih opterećenja, što je izrazitije s većom penetracijom EV do 2050.. Kako se vidi iz povećanje opterećenja je veće vikendom zbog manje potrošnje električne energije.

**Tablica 12. Utjecaj potrošnje električne energije za punjenje EV na vršno opterećenje satne krivulje potrošnje**

| GODINA | POVEĆANJE VRŠNOG OPTEREĆENJA,<br>kWh/h (RADNI DAN) | POVEĆANJE VRŠNOG OPTEREĆENJA,<br>kWh/h (DAN VIKENDA) |
|--------|--|--|
| 2020.  | 44,9   | 56,6   |
| 2030.  | 2522,3   | 3073,5   |
| 2050.  | 6587,9   | 7229,2   |

U cilju smanjenja povećanja vršnih opterećenja razvijen je model reguliranog punjenja koji se temeljio na potrebama mreže u svrhu izravnjanja satne distribucije potrošnje i smanjenja troška punjenja. Dobivenim rezultatima pokazalo se da regulirano punjenje bolje zadovoljava zahtjeve mreže i smanjuje ukupni trošak punjenja jer se punjenje odvija u satima niske potrošnje električne energije kada je i cijena električne energije niža što smanjuje ukupni trošak, ali i utjecaj EV na povećanje vršne potrošnje. S obzirom da ovaj pristup u isto vrijeme ne zadovoljava potrebe potrošača i mreže, a isto tako ne uzima u obzir proizvodnju električne energije, u stvarnosti se ne bi mogao primjenjivati. Stoga je bilo potrebno izvesti simulacije koje će uključivati proizvodnju i potrošnju u cilju zadovoljenja potreba potrošnje iz raspoložive proizvodnje električne energije.

Kako je u radu planirano da proizvodnja električne energije bude u potpunosti zastupljena proizvodnjom iz OIE, to je zahtijevalo uvođenje spremnika energije.

Izvele su se simulacije svih zadanih scenarija prema više vrsta modela punjenja EV i analizom rezultata utvrdilo se koji od modela punjenja bolje zadovoljava regulaciju EES.

U 2020. se pretpostavilo da će regulacija, uz neregulirano punjenje, za jedan model dijelom biti ostvarena fleksibilnom potrošnjom, a za drugi model pametnim punjenjem EV. Nakon izvršene simulacije u programu EnergyPLAN nije bilo razlike među modelima. Oba modela imaju jednak utjecaj na povećanje vršnog opterećenja od 18 kWh/h, jer je u svakom modelu zastupljen jednak postotak nereguliranog punjenja EV koje utječe na povećanje vršnih opterećenja. Oba modela ostvaruju CEEP u iznosu od 288, 92 GWh/god. Kada bi sustav bio u potpunosti reguliran u 2020. ne bi bilo povećanja vršnih opterećenja.

Regulacija pametnim punjenjem općenito se smatra povoljnijom od fleksibilne potrošnje jer zadovoljava potrebe mreže i potrebe vozača, dok fleksibilna potrošnja nastoji smanjiti vršnu proizvodnju i puniti vozila u vrijeme niske potrošnje, ali ne provodi regulaciju u cilju zadovoljenja potreba vozača.

Scenarij za 2030. godinu obuhvaćao je model pametnog punjenja i fleksibilne potrošnje. Iz rezultata simulacije dalo se zaključiti da pametno punjenje ima povoljniji utjecaj u optimiranju EES, kako u pogledu povećanja vršne potrošnje tako i u smanjenju CEEP. Fleksibilna potrošnja povećava CEEP za 0,35 GWh/god. i vršno opterećenje za 20096 kWh/h više od pametnog punjenja.

Za 2050. odabran je model pametnog punjenja i V2G vozila, koji osim punjenja vozila uključuju i pražnjenje u svrhu snabdijevanja mreže električnom energijom u vrijeme manjka proizvodnje. Model je uspoređen s modelom fleksibilne potrošnje koja je dala povoljnije rezultate u svrhu smanjenja CEEP, kojeg proizvede za 1,16 GWh/god. manje od V2G modela, ali je povećala vršna opterećenja za 19001 kWh/h. Razlog tome je što je u modelu, koje uključuje pametno punjenje zajedno s funkcijom V2G vozila, dodatno uvedena regulacija u cilju zadovoljenja minimalnog troška pa se model, osim zahtjevima vozača i mreže, prilagođava i cijeni električne energije kako bi ostvario minimalni trošak punjenja.

Sva tri scenarija s modelima punjenja promatrani su kao izolirani sustavi i zbog toga se javlja kritični višak proizvodnje, ujedno i manjak proizvodnje, jer nisu određeni kapaciteti prijenosa električne energije za uvoz i izvoz. U radu je dat i prikaz povećanja CEEP s povećanjem instalirane snage obnovljivih izvora.

Iz toga se vidi da EES, koji uključuje EV u regulaciju odnosa proizvodnje i potrošnje električne energije, ima manji kritični višak proizvodnje od onog EES koje ne uključuje EV u sustavu. To dovodi do zaključka da EES koji uključuju OIE u svoju proizvodnju ne mogu funkcionirati bez skladištenja električne energije. U scenariju za 2050. godinu je najveća razlika u kritičnoj proizvodnji između ovakva dva sustava jer je i penetracija EV u toj godini najveća pa je omogućeno skladištenje većih kapaciteta električne energije, proizvedene iz OIE, u baterije EV.

Da bi se omogućio rad ovih sustava bilo je potrebno odrediti iznose opterećenja mreže na dalekovodima, odnosno postaviti ih kao otvorene sustave, koji bi osigurali snabdijevanje sustava električnom energijom u vrijeme manjka proizvodnje i isto tako osigurali izvoz viška proizvedene električne energije. Isto tako, određen je i postotak u kojem mreža sudjeluje u stabilizaciji prijenosnih kapaciteta električne energije kako bi se osigurala stabilizacija sustava.

Iz toga se da zaključiti kako je ovakve sustave teško regulirati i predstavljaju izazov za energetske sektor. Takvi sustavi zahtijevaju korištenje informacijskih i komunikacijskih tehnologija (ICT) kako bi se omogućila komunikacija između komponenti sustava. Implementacijom tih tehnologija omogućila bi se uspješnija regulacija sustava u cilju zadovoljenja potreba potrošnje iz proizvodnje električne energije.

## LITERATURA

- [1] European Commission, Eurostat, 2010.,  
[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Consumption\\_of\\_energy](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Consumption_of_energy)
- [2] European Environment Agency, 2009., <http://www.eea.europa.eu/>,  
[http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETIKA\\_I\\_OKOLI%C5%A0#Smanjenje\\_emisije\\_CO2\\_pri\\_proizvodnji\\_elektri.C4.8Dne\\_energije](http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETIKA_I_OKOLI%C5%A0#Smanjenje_emisije_CO2_pri_proizvodnji_elektri.C4.8Dne_energije)
- [3] Direktiva 2009/30/EZ Europskog parlamenta i vijeća, 2009.
- [4] "Strategija energetskega razvoja Republike Hrvatske", (*»Narodne novine«*, br. 68/01., 177/04., 76/07. i 152/08.), [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009\\_10\\_130\\_3192.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_10_130_3192.html), 2009.
- [5] Kempton, W., Tomic, J., "Vehicle to Grid Fundamentals: Calculating Capacity and Net Revenue", *J. Power Sources* Volume 144, Issue 1, Pages 268-279, doi:10.1016/j.jpowsour.2004.12.025, 2005.
- [6] Rousseau, A. et al., "PHEV Control Strategy Parameter Optimization", *Journal of Asian Electric Vehicles*, 6, pp. 1125-1133, 2008.
- [7] Lee, T.-K., Filipi, Z., "Simulation Based Assessment of PHEV Behavior During Real-World 24-Hour Missions", SAE paper No. 2010-01-0827.
- [8] Rotering, N., Ilic, M., "Optimal Charge Control of PHEV in Deregulated Electricity Markets", *IEEE Transactions on Power Systems* (in press), 2011.
- [9] Lund, H., Kempton, W., "Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G", *Energy Policy*, 36, pp. 3578-3587, 2008.
- [10] Kempton, W., Tomić, J., "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy", *Journal of Power Sources*, 144, pp. 280–294, 2005.
- [11] "i-RESEV projekt" (ICT-aided integration of Electric Vehicles into the Energy Systems with a high share of Renewable Energy Sources), <http://powerlab.fsb.hr/iresev/>
- [12] MIT Study on the Future of the Electric Grid, Chapter 3: "Integration of Variable Energy Resources", pp. 53-76, 2011.
- [13] Hrvatska elektroprivreda d.d., 2012.,  
[www.hep.hr/proizvodnja/osnovni/hidroelektrane/dubrovnik/default.aspx](http://www.hep.hr/proizvodnja/osnovni/hidroelektrane/dubrovnik/default.aspx)

- [14] National Renewable Energy Laboratory, "Getting Started Guide for HOMER Version 2.1", 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, USA, 2005.
- [15] Bando, M., Bukvić, I., Cvjetković, I., Miličić, N., Peran, V., Vuković, Z., Kosmat, L., Landek, S., Majstorović, I., Njegovec, M., Pološki, D., Rigo, A., Stepan, Ž., "Prometna studija Grada Dubrovnika", 2012.
- [16] Pukšec, T., Lulić, Z., Van Mathiesen, B., Duić, N., "Energy Policy and Long Term Energy Demand of a Transport Sector: Case Study Croatia", 2011.
- [17] Weller, C., "Plug-in hybrid electric vehicle impacts on hourly electricity demand in the United States. Energy Policy", 39, 3766-3778, 2011.
- [18] Clement, K., Van Reusel, K., Driesen, J., "The consumption of electrical energy of plug-in hybrid electric vehicles in Belgium", in: 2nd Eur. Ele-Drive Transportation Conf, Brussels, Belgium, 2007.
- [19] Jenkins, S.D., Rossmair, J., Ferdowsi, M., "Utilization and effect of plug-in hybrid electric vehicles in the United States power grid", in: IEEE Vehicle and Propulsion Conference (VPPC), 2008.
- [20] Hill, G., Blythe, P. T., Hübner, Y., Neaimeh, M., Higgins, C., Suresh, V., "Monitoring and Predicting Charging Behaviour for Electric Vehicles", 2012.
- [21] Clement-Nyns, K., Haesen, E., Driesen, J., "The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid", Electric Power Systems Research 81, pp. 185–192, 2011.
- [22] Tomic, J., Kempton, W., "Using fleets of electric-drive vehicles for grid support", J. Power Sources 168, pp. 459–468, 2007.
- [23] EPRI White Paper, "A Review of the Reliability of Electric Distribution System Components", Palo Alto, CA, 2001.
- [24] Mackay, D.J.C., "Sustainable Energy—Without the Hot Air", UITCambridge Ltd., Cambridge, England, 2009.
- [25] Camus, C., Farias, T., "Impacts of electric vehicles' charging strategies in the electricity prices", Lisbon, Portugal, 2011.
- [26] EPRI, "Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options" EPRI, 1000349. July 2001.
- [27] Perujo, A., Ciuffo, B., "The introduction of electric vehicles in the private fleet: Potential impact on the electric supply system and on the environment. A case study for the Province of Milan, Italy, Energy Policy", Vol. 38, Issue 8, pp. 4549–4561, 2010.
- [28] Altairnano, 2009., <http://www.altairnano.com>.

- [29] Kang, D.J., Park, S., "A Case Study on the Grid Impact of PHEVs to Distribution Power System", Yonsei University, IEEE, 2011.
- [30] Clement, K., Van Reusel, K., Driesen, K., "The consumption of electrical energy of plug-in hybrid electric vehicles in Belgium." In: Proceedings of the European Ele-Drive Conference. Brussels, Belgium, 2007.
- [31] Ruayariyasub, S., Thammasiriroj, W., "The Impact of Unexpected Power Demand from Electric Vehicles on Future Load Profiles: Case Study on Thailand", IEEE, 2011.
- [32] Steen, D., Tuan, L., Carlson, O., Bertling, L., "Assessment of Electric Vehicle Charging Scenarios Based on Demographical Data", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 3, NO. 3, 2012.
- [33] Halvgaard, R., Poulsen, N.K., Madsen, H., Jørgensen, J.B., Marra, F., Esteban Morales Bondy, D.E.M., "Electric Vehicle Charge Planning using Economic Model Predictive Control", Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012.
- [34] Pillai, J. R., "Electric Vehicle based Battery Storages for Large Scale Wind Power Integration in Denmark", Ph.D. Thesis, Aalborg University, Denmark, Dec. 2010.
- [35] Li, F., Qiao, W., Sun, H., Wan, H., Wang, J., Xia, Y., Xu, Z., Zhang, P., "Smart transmission grid: Vision and framework," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 2, pp. 168–177, 2010.
- [36] He, Y., Venkatesh, B., Guan, L., "Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicles", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 3, NO. 3, 2012.
- [37] Li, Q., Cui, T., Negi, R., Franchetti, F., Illic, M.D., "On-line Decentralized Charging of Plug-In Electric Vehicles in Power Systems," 2011.
- [38] Doostizadeh, M., Khanabadi, Esmaeilian, A., Mohseninezhad, M., "Optimal energy management of a retailer with smart metering and Plugin Hybrid Electric Vehicle," in Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on, pp. 1–5, 2011.
- [39] Bashash, S., Moura, S., Fathy, H., "Charge trajectory optimization of plug-in hybrid electric vehicles for energy cost reduction and battery health enhancement," in American Control Conference (ACC), pp. 5824–5831, 2010.
- [40] Sundström, O., Binding, C., "Planning electric-drive vehicle charging under constrained grid conditions", in 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON), pp. 1–6., 2010.

- [41] —, "Charging Service Elements for an Electric Vehicle Charging Service Provider", in Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting, Detroit, 2011.
- [42] Hrvatska elektroprivreda, Operator distribucijskog sustava, (HEP ODS d.o.o.) <http://www.hep.hr/ods/kupci/tarifni.aspx>
- [43] Krajačić, G., Duić, N., da Graça Carvalho, M., "H2RES, Energy planning tool for island energy systems – The case of the Island of Mljet", International journal of hydrogen energy 34, pp. 7015 – 7026, 2009.
- [44] Duić, N., Krajačić, G., da Graça Carvalho, M., "RenewIslands methodology for sustainable energy and resource planning for islands", Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, pp. 1032–1062, 2008.
- [45] Järventausta, P., Repo, S., Rautiainen, A., Partanen, J., "Smart grid power system control in distributed generation environment", Annual Reviews in Control 34, pp. 277–286, 2010.
- [46] Chuang, A., "EPRI smart grid R&D overview", Presentation at HP sustainability innovation workshop, 2010.
- [47] Lund, H., "EnergyPLAN - Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 10.0", Published online from: [www.EnergyPLAN.eu](http://www.EnergyPLAN.eu), Aalborg University, Denmark, 2012.
- [48] Ministarstvo gospodarstva Republike Hrvatske, 2012, [http://oie-aplikacije.mingo.hr/pregledi/PopupIzvjestaj.aspx?ReportId=5b47346e-67aa-4df2-9603-fa83c47061e3#P32ed9c04a3d843c08f17e75a12c7aad8\\_2\\_179iT1R0x0](http://oie-aplikacije.mingo.hr/pregledi/PopupIzvjestaj.aspx?ReportId=5b47346e-67aa-4df2-9603-fa83c47061e3#P32ed9c04a3d843c08f17e75a12c7aad8_2_179iT1R0x0)
- [49] Šare, A., Završni rad: "Energetski nezavisna zgrada kao energetsko postrojenje"/ Mentor: Duić, N./ Komentor: Soldo, V., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [50] Kempton, W., Tomic, J., Letendre, S., Brooks, A., Lipman, T., "Vehicle-to-Grid Power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California", UCD-ITS-RR-01-03, 2001.
- [51] Lassila, J., Kaipia, T., Haakana, J., Partanen, J., Järventausta, P., Rautiainen, A., "Electric cars—challenge or opportunity for the electricity distribution infrastructure?" European conference smart grids and mobility, 2009.
- [52] Lund, H., Münster, E., "Integrated transportation and energy sector CO<sub>2</sub> emission control strategies", Transport Policy 13 (5), pp. 426–433, 2006.



- [53] Mathiesen, B.V., Lund, H., Nørgaard, P., "Integrated transport and renewable energy systems" *Utilities Policy* 16 (2), pp. 107–116, 2008.
- [54] Markel, T., Kuss, M., Denholm, P., "Communication and Control of Electric Vehicles Supporting Renewables", National Renewable Energy Laboratory, IEEE Vehicle Power and Propulsion, 2009.
- [55] Bracale, A., Caramia, P., Proto, D., "Optimal Operation of Smart Grids Including Distributed Generation Units and Plug in Vehicles", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'11), 2011.
- [56] Brooks, A., Lu, E., Reicher, D., Spirakis, C., Wehl, B., "Demand Dispatch: Using Real-Time Control of Demand to Help Balance Generation and Load", *IEEE Power & Energy Magazine*, pp. 20-29, 2010.
- [57] Kempton, W., Kubo, T., "Electric-drive vehicles for peak power in Japan", *Energy Policy* 28 (1), pp. 9–18, 2000.
- [58] Kempton, W., Letendre, S.E., "Electric vehicles as a new power source for electric utilities" *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2 (3), 157–175, 1997.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija