

Isplativost pametnih mjera iz područja energetike u okviru koncepta pametnih gradova

Markoč, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:988892>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mislav Markoč

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor

Dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Mislav Markoč

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru Dr.sc. Goranu Krajačiću na ukazanom vremenu i uloženom trudu. Također bih se želio zahvaliti Viktoriji Dobravec i Nikoli Mataku na korisnim savjetima i ispravicima. Na kraju, zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima i djevojci koji su mi pružali podršku tijekom školovanja.

Mislav Markoč



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mislav Markoč**

Mat. br.: 0035195758

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Isplativost pametnih mjera iz područja energetike u okviru koncepta pametnih gradova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Profitability of smart energy measures within the framework of the smart city concept**

Opis zadatka:

Procjenjuje se da danas više od 70 % stanovništva Europske unije (EU-28) živi u urbanim područjima - gradovima i gradskim predgradima. Gradovi su pokretači gospodarskog razvoja, ali su i odgovorni za proizvodnju značajnog udjela emisija ugljičnog dioksida. Oni predstavljaju veliki potencijal za smanjenje potrošnje energije i povećanje energetske učinkovitosti te imaju ključnu ulogu u održivom energetsom razvoju. Koncept pametnih gradova primjer je održivog gospodarskog i energetske razvoja urbanih područja. U okviru pametnih gradova postoji nekoliko značajnih tehničkih rješenja koja mogu snažno doprinijeti smanjenju emisija ugljičnog dioksida.

U okviru zadatka, student će za predložena rješenja provesti tehno-ekonomsku analizu za grad Zagreb. U radu je potrebno:

1. Napraviti detaljan pregled literature u području pametnih gradova s naglaskom na primjenu pametnih mjera iz područja energetike;
2. Dati opis nekoliko istaknutih primjera pametnih gradova EU-28 te pregled projekata pametnih gradova na razini Republike Hrvatske. Za zadani grad napraviti referentni model sustava u računalnom programu EnergyPLAN te napraviti scenarijsku analizu pametnih mjera s obzirom na „kritični višak proizvodnje električne energije“ (CEEP), ukupnu cijenu scenarija, emisije CO₂, uvoz/izvoz električne energije;
3. Analizirati mjere: pametno parkiranje, integracija centraliziranog toplinskog i rashladnog sustava s mogućnošću korištenja kanalizacijskog sustava kao izvora otpadne topline, solarnih toplinskih kolektora i dizalica topline, integracija solarnih fotonaponskih (PV) elektrana i električnih vozila, korištenje pametne javne rasvjete.

U obzir uzimati prostorna ograničenja za instalaciju solarnih panela i kolektora. Centralizirani toplinski i rashladni sustav modelirati tako da pokriva 50 % potreba za toplinskom i rashladnom energijom u zadanom gradu. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA I DIJAGRAMA	III
POPIS KRATICA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
1.1. Moderna gradska naselja	1
1.2. Koncept održivog razvoja	2
1.3. Pametni gradovi	3
2. PAMETNE MJERE IZ PODRUČJA ENERGETIKE	5
2.1. Prometna rješenja	5
2.2. Pametna rasvjeta	8
2.3. Toplinski i rashladni sustavi	8
2.4. Solarne fotonaponske elektrane	11
3. PRIMJERI PAMETNIH GRADOVA	12
3.1. Europska unija	12
3.2. Republika Hrvatska	18
4. ENERGETSKO MODELIRANJE GRADA ZAGREBA	24
4.1. EnergyPLAN	24
4.2. Referentni model	26
4.3. Implementacija pametnih mjera	34
4.4. Usporedba implementiranih pametnih mjera	46
5. ZAKLJUČAK	50
LITERATURA	51

POPIS SLIKA

Slika 1.	Kretanje postotka urbanizacije u Europi	1
Slika 2.	Stupovi koncepta održivog razvoja	2
Slika 3.	Ilustracijski prikaz pametnog grada	3
Slika 4.	Pametne vertikalne garaže	6
Slika 5.	Senzori na parkirnim mjestima	6
Slika 6.	Punjenje električnog automobila u Zagrebu	7
Slika 7.	Shema solarnog toplinskog kolektora	10
Slika 8.	Solarna fotonaponska (PV) elektrana	11
Slika 9.	Nova autobusna mreža Barcelone	13
Slika 10.	Povezanost sustava pametnih prskalica s bazom podataka	14
Slika 11.	Jednostavna shema mjehuričaste barijere	15
Slika 12.	Mreža centraliziranog sustava hlađenja u Parizu	17
Slika 13.	Anti-smog tornjevi – jedan od osam modela energetske pozitivnih zgrada	17
Slika 14.	Kontejneri s RFID čipovima	19
Slika 15.	Sučelje aplikacije „Smart Parking Dubrovnik“	20
Slika 16.	Pametne govornice u Zadru	21
Slika 17.	Sučelje računalnog programa EnergyPLAN – verzija 2017.....	25
Slika 18.	Shematski prikaz toka energetske bilance Grada Zagreba za 2016. godinu.....	26
Slika 19.	Satna potražnja električne energije u RH za 2012. godinu.....	27
Slika 20.	Satna distribucija uvoza električne energije u RH za 2012. godinu	27
Slika 21.	Podjela CTS-a u EnergyPLAN-u	30
Slika 22.	Proizvodne jedinice TE-TO Zagreb	31
Slika 23.	Proizvodne jedinice EL-TO Zagreb	31
Slika 24.	Vrste simulacija u EnergyPLAN-u	32
Slika 25.	Rezultati referentnog modela Grada Zagreba za 2016. godinu 1/2	33
Slika 26.	Rezultati referentnog modela Grada Zagreba za 2016. godinu 2/2	33
Slika 27.	Rezultati implementacije koncepta pametne rasvjete 1/2	36
Slika 28.	Rezultati implementacije koncepta pametne rasvjete 2/2	36
Slika 29.	Rezultati implementacije CRS-a i pametnog CTS-a 1/2.....	38
Slika 30.	Rezultati implementacije CRS-a i pametnog CTS-a 2/2.....	38
Slika 31.	Rezultati implementacije PV modula 1/2.....	40
Slika 32.	Rezultati implementacije PV modula 2/2.....	40
Slika 33.	Rezultati implementacije električnih vozila 1/2.....	42
Slika 34.	Rezultati implementacije električnih vozila 2/2.....	43
Slika 35.	Rezultati skupne implementacije pametnih mjera 1/2	44
Slika 36.	Rezultati skupne implementacije pametnih mjera 2/2	45

POPIS TABLICA I DIJAGRAMA

Tablica 1. Neposredna potrošnja energije u Gradu Zagrebu	28
Tablica 2. Neposredna potrošnja energije u kućanstvima	29
Tablica 3. Neposredna potrošnja u sektoru usluga	29
Tablica 4. Potrošnja energije u prometu za Grad Zagreb u 2016. godini	30
Tablica 5. Ukupni toplinski i električni kapaciteti	31
Tablica 6. Broj prijeđenih kilometara u 2016. godini.....	41
Tablica 7. Broj prijeđenih kilometara u 2016. godini.....	42
Dijagram 1. Usporedba pametnih mjera prema CEEP.....	46
Dijagram 2. Usporedba pametnih mjera prema ukupnoj godišnjoj cijeni	47
Dijagram 3. Usporedba pametnih mjera po uvozu električne energije	48
Dijagram 4. Usporedba pametnih mjera po izvozu električne energije	48
Dijagram 5. Usporedba pametnih mjera po emisijama CO ₂	49

POPIS KRATICA

Kratika/Oznaka	Opis
BEV	Battery Electric Vehicle
CEEP	Critical Excess Electricity Production
CO ₂	Ugljični dioksid
COP	Coefficient of Performance
CRS	Centralizirani rashladni sustav
CTS	Centralizirani toplinski sustav
EBPP	Electronic Bill Presentment and Payment
EIB	European Investment Bank
EIP - SCC	European Innovation Partnership Smart Cities and Communities
ELENA	European Local Energy Assistance
ERAU	Embry – Riddle Aeronautical University
EU	Europska unija
ICT	Informacijsko komunikacijske tehnologije
INEA	Innovation and Networks Executive Agency
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light Emitting Diode
PEV	Plug-in Electric Vehicles
PV	Photo Voltaic
RH	Republika Hrvatska
RFID	Radio Frequency Identification

SAŽETAK

Procjenjuje se da danas više od 70 % stanovnika Europske unije živi u urbanim područjima – gradovima i gradskim predgrađima. Gradovi su pokretači napretka i razvoja, ali i odgovorni za značajan dio štetnih emisija. Stoga upravo oni predstavljaju veliki potencijal za primjenu koncepta energetske održivosti koji uključuje smanjenje potrošnje energije te povećanje energetske učinkovitosti što rezultira smanjenjem štetnih emisija.

Pametni gradovi primjer su održivog gospodarskog i energetskeg razvoja urbanog područja. Energetske pametne mjere između ostalog uključuju prometna rješenja, pametnu rasvjetu, centralizirane toplinske i rashladne sustave te integraciju obnovljivih izvora energije.

U okviru rada nabrojane su pametne mjere iz područja energetike te dani primjeri pametnih gradova na području Europske unije i Republike Hrvatske. Zatim je, za pet odabranih pametnih mjera – pametno parkiranje, pametna rasvjeta, integracija centraliziranog toplinskog i rashladnog sustava s dizalicama topline i solarnim kolektorima, integracija električnih vozila te integracija PV modula provedena tehno-ekonomska analiza za Grad Zagreb.

Analiza je provedena u računalnom programu EnergyPLAN, a rezultati su uspoređeni s referentnim modelom na temelju pet odabranih parametara. Simulacija je pokazala kako svaka od mjera smanjuje štetne emisije CO₂, najviše integracija električnih vozila – čak 8,26 %. Što se tiče financijskih ušteda, tu prednjači instaliranje PV modula s povratom investicije od 1,258 godina. S druge strane, sustav pametnog parkiranja ima velike investicijske troškove, a jedva vidljive uštede. Idealan scenarij bila bi provedba svih mjera istovremeno čime bi se ostvarilo smanjenje emisija od 9,13 % te smanjila ukupna godišnja cijena sustava za 869 milijuna eura.

Ključne riječi: održivi razvoj, pametni gradovi, energetska učinkovitost, emisije CO₂, obnovljivi izvori energije, EnergyPLAN, Zagreb

SUMMARY

It is estimated that today more than 70 % of European population lives in urban areas – cities and city suburbs. Cities are initiators of development, but, at the same time, the ones responsible for a significant part of harmful emissions. Therefore, cities represent great potential for implementation of the concept of energy sustainability, which includes reduction of energy consumption and increase of energy efficiency resulting in the reduction of harmful emissions.

Smart cities are examples of both economical and energetical sustainable development of urban areas. Smart measures in energetics include, among other things, traffic solutions, smart lighting, district heating and cooling systems and integration of renewable energy sources.

Within the framework of the paper smart measures in the field of energetics are listed and examples of smart communities, both in EU and Republic of Croatia are given. For five chosen measures – smart parking technology, smart lighting, district heating and cooling system with solar collectors and heat pumps, integration of PV modules and integration of electric vehicles, technical and economic analysis for the City of Zagreb was conducted.

Analysis was conducted in computer program EnergyPLAN and the results were compared with the reference model based on five chosen parameters. Simulation has shown that each of the implemented measures reduces the emission of CO₂, most notably integration of electric vehicles with a reduction of 8,26 %. From the economic standpoint, integration of PV modules has been proven the best with return of investment period of 1,258 years. On the other hand, the smart parking system is characterized by great investment costs and barely visible savings. The ideal scenario would include simultaneous implementation of all measures which would result in 9,13 % reduction of CO₂ emission and 869 million € decrease of annual costs.

Key words: sustainable development, smart cities, energy efficiency, CO₂ emission, renewable energy sources, City of Zagreb, EnergyPLAN

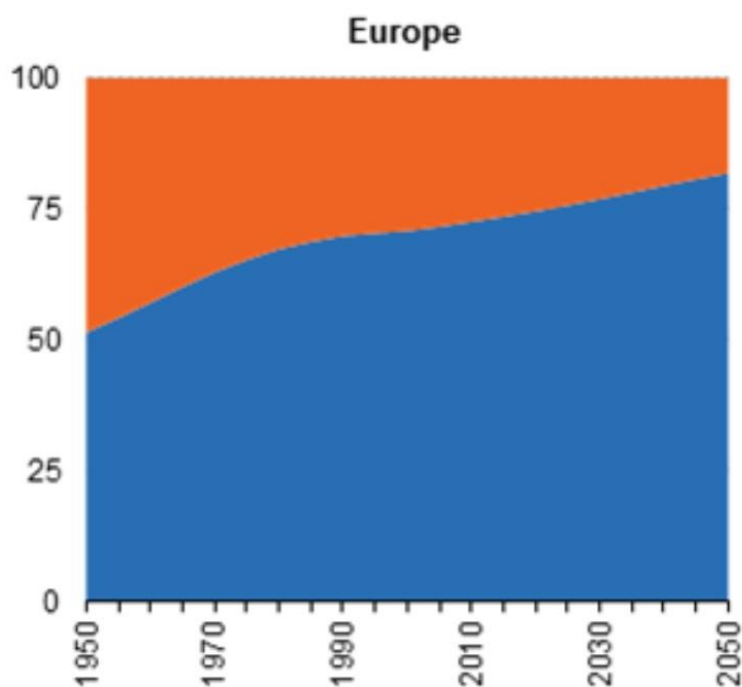
1. UVOD

1.1 Moderna gradska naselja

Gradsko naselje ili skraćeno grad, označava veće, kompaktno izgrađeno naselje, organizirano u više ili manje povezanu, diferenciranu društvenu zajednicu – gradsku općinu, koju čine građani toga grada [1].

Gradska naselja su oduvijek predstavljala izvor ljudskog napretka, mjesto na kojem su se, zbog koncentriranih i lako dostupnih različitih vrsta znanja, rađale inovacije i unaprjeđivala civilizacija.

S razvojem civilizacije sve je više rastao i postotak urbanizacije (Slika 1.). Gradovi danas, prema podacima Ujedinjenih Naroda, obuhvaćaju čak 55 % sveukupnog stanovništva na planetu Zemlji (7,6 milijarde ljudi), a procjenjuje se kako će taj postotak do 2050. godine narasti na 68 %. U razvijenim zemljama 'zapadne civilizacije' taj je postotak daleko veći pa tako u Europi čak 74% stanovništva živi u urbanim područjima – gradovima i gradskim predgrađima [2].



Slika 1. Kretanje postotka urbanizacije u Europi

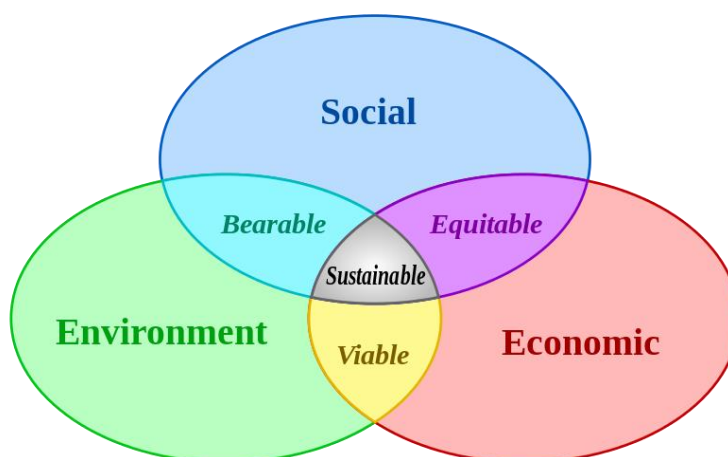
U doba kada je čovječanstvo uočilo posljedice koje sa sobom nosi zagađenje okoliša i povezane klimatske promjene, gradovi su označeni kao odgovorni za proizvodnju velikog udjela štetnih emisija CO₂. Stoga upravo oni predstavljaju veliki potencijal za primjenu pametnih metoda uštede energije, odnosno povećanja energetske učinkovitosti te posljedično smanjenja štetnih atmosferskih emisija.

Te metode implementirane su u koncept održivog razvoja s energetske i gospodarske gledišta, a gradovi koji pomoću tehnoloških mjera teže k prilagodbi tom konceptu nazivaju se pametnim gradovima.

1.2 Koncept održivog razvoja

Tijekom procesa razvoja čovječanstva zanemario se negativan utjecaj na okoliš, ali i samo društvo. Stoga je bilo nužno postaviti koncept prema kojem bi se razvoj mogao nastaviti u takvom obliku da osigura perspektivnu i stabilnu budućnost. Taj koncept se naziva konceptom održivog razvoja, a prema definiciji Brundtlandske komisije ¹ on se definira kao „razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolji vlastite potrebe“.

Cjelokupan pojam održivosti najčešće se pokazuje preko tri stupa – ekološkog, socijalnog i ekonomskog, koji samo u međusobnom balansu omogućuju održivi razvoj (Slika 2.).



Slika 2. Stupovi koncepta održivog razvoja [3]

Kao što se i može pretpostaviti, održivost mora biti prisutna u svim područjima ljudske djelatnosti, a posebno je neophodna briga za očuvanje okoliša. Isto tako, kontrolirati se mora i broj stanovnika, potrošnja resursa kao što su hrana, voda, šume, ali i energija. No s druge strane, u socijalnom aspektu koncepta mora se osigurati mir, sigurnost i socijalna pravda kao preduvjeti za ugodan život ljudske civilizacije.

¹ Brutlandska komisija je tijelo Ujedinjenih Naroda koje ima za cilj ujediniti sve nacije svijeta u cilju prihvaćanja koncepta održivog razvoja

Koncept pametnog grada nastoji prodrijeti u sve aspekte ljudskog života i djelovanja pa se tako njegova primjena može naći u prometnom sektoru, sektoru zgradarstva, opskrbi različitim oblicima energije, ali i drugim kategorijama kao što su zdravstvo, školstvo i gradska uprava.

Razvitkom tehnologije broj ideja koje obuhvaća koncept pametnog grada svakim danom sve više i više raste. Tako primjerice Amsterdam, koji je svoj plan razvoja prema modelu pametnog grada pokrenuo još 2009. godine, svake godine raspisuje natječaj na koji se javljaju inovatori s idejama o unapređenju života u glavnom gradu Nizozemske pomoću tehnološki naprednih rješenja.

Cilj je iskoristiti dostupnu tehnologiju za unapređenje života građana uz naglasak na održivosti kao glavnom motivu. Tako pametne mjere mogu se pronaći u administrativnim uredima gdje bi se trebala omogućiti lakša i tehnološki naprednija rješenja pomoću kojih bi građani mogli dobiti potrebne informacije i podatke. Također, u obrazovanju bi se trebala poticati kreativnost i inovativnost kao budući stupovi razvoja, a gospodarstvo bi trebalo integrirati sve više start-up poduzeća kojima su glavni resursi ljudska pamet i inovativnost.

S energetskeg gledišta, postoji širok velik broj modernih tehnologija koje bi se mogle koristiti u smanjenju potrošnje energije, povećanju energetske učinkovitosti, a shodno tome i smanjenju štetnih emisija.

2. PAMETNE MJERE IZ PODRUČJA ENERGETIKE

Kao što je već spomenuto, spektar energetskih metoda u konceptu pametnih gradova vrlo je širok, no sve metode imaju jedan zajednički cilj – povećanje energetske efikasnosti te smanjenje rasipanja energije i zagađenja okoliša.

2.1 Prometna rješenja

Jedna od najprepoznatljivijih karakteristika gradskih područja je gust promet. Privatni i službeni automobili, zajedno s razgranatom mrežom javnog prijevoza, svakodnevno svojim ispušnim plinovima zagađuju ulice svih većih gradova. Stoga su gotovo svi veći europski gradovi unazad nekoliko desetljeća počeli s kampanjom čiji je cilj promoviranje korištenja javnog gradskog prometa ili CO₂ neutralnih načina transporta (npr. bicikl) umjesto osobnih automobila. Velike metropole Europske Unije kao što su Pariz ili London već godinama ograničavaju promet u samom središtu grada koristeći poseban sustav naljepnica koje omogućuju ulazak u centar samo određenom, kontroliranom, broju vozila. Koliko je stanje u nekim predjelima svijeta postalo alarmantno najbolje govori primjer iz kineske prijestolnice Pekinga gdje je prometno zagađenje zraka postalo toliko da su vlasti bile primorane uvesti sistem parnih i neparnih brojeva na tablicama².

Prema Agenciji za zaštitu okoliša Sjedinjenih Američkih Država (USEPA) čak 28 % cjelokupne emisije stakleničkih plinova dolazi kao posljedica transporta. Sama vozila uzrokuju čak 75 % emisija ugljikovog monoksida, a u urbanim sredinama između 50 i 90 % ukupno onečišćenja zraka.

I) Pametno parkiranje

Vožnja prilikom traženja parkirnog mjesta povećava količinu štetnih tvari nepotrebno ispuštenih u okoliš. Uzimajući u obzir prosječno vrijeme traženja parkinga, prosječnu potrošnju goriva automobila te prosječnu emisiju štetnih plinova lako matematički može prikazati smanjenje emisija stakleničkih plinova nastalo smanjenjem vremena traženja slobodnog parkirnog mjesta. Takav brojčani izračun korišten je u nastavku rada prilikom modeliranja ušteda za grad Zagreb.

Kod parkiranja u urbanim područjima postoje dva glavna problema – nedostatak parkirnog prostora i nemogućnost lociranja slobodnih parkirnih mjesta.

² Sistem parnih i neparnih brojeva na tablicama podrazumijeva da se u određenim danima u tjednu smiju prometovati samo vozila s parnim, odnosno neparnim brojevima registarskih oznaka

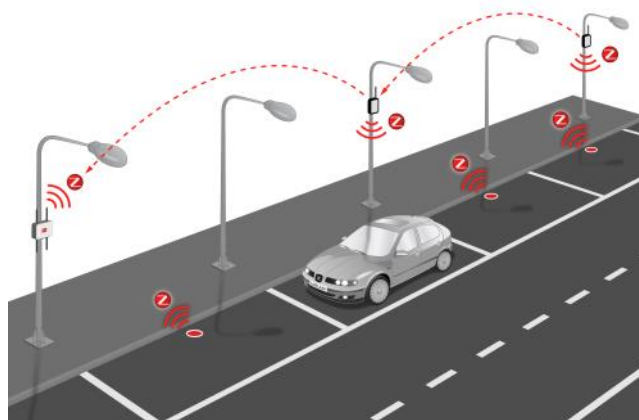
Jedno od postojećih rješenja za prvi problem jest konstruiranje pametnih parkirnih prostora koja mehanizirano slažu automobile u vertikalne stupce smanjujući tako prostor potreban za pohranu automobila (Slika 4.).



Slika 4. Pametne vertikalne garaže [6]

Za postavljanje pametnih garaža i parkirnih mjesta potrebne su velike investicije, što nije slučaj s rješenjem za problem traženja slobodnog parkirnog mjesta.

Tehnološko rješenje tog pitanja obuhvaća postavljanje senzora na parkirna mjesta (Slika 5.) te programiranje aplikacije za pametne telefone i uređaje koja će svojim korisnicima prikazati slobodna parkirna mjesta na željenom parkingu i ih navigirati do istih. Takvo rješenje odnedavno je moguće vidjeti i u gradu Splitu koji je na dva parkirališta postavio spomenutu opremu te tako olakšao traženje slobodnih mjesta vozačima.



Slika 5. Senzori na parkirnim mjestima [7]

II) Električni i hibridni automobili

Kada je postalo jasno kako fosilna goriva imaju ograničene rezerve te vrlo štetno djeluju na okoliš, automobilski svijet se okrenuo traženju alternativnog načina pogona vozila.

Tako su nastali hibridni pogoni, a u novije vrijeme i električni automobili koji se smatraju neutralnima po pitanju direktne emisije stakleničkih plinova, tj. emisije koja nastaje prilikom vožnje automobila. S druge strane, indirektna emisija stakleničkih plinova, ona nastala prilikom proizvodnje samog vozila te proizvodnje električne energije, još uvijek je prisutna.

Najveći problem tehnologije bio je razvoj baterija koje su sposobne pokretati električna vozila. No, taj je problem riješen osmišljavanjem vozila koja se mogu napajati na vanjskom izvoru struje (PEV – Plug in Electric Vehicles). Među podskupine PEV-a spadaju električna vozila koja za pokretanje koriste isključivo kemijsku energiju ukomponiranoj bateriji koju je moguće puniti (BEV – Battery Electric Vehicles) te hibridna vozila koja se, uz bateriju pogodnu za punjenje, mogu pogoniti i na električnu energiju iz internog generatora te motor s unutrašnjim izgaranjem. Komercijalizacija električnih vozila sa sobom povlači i pitanje postavljana infrastrukture – zbog relativno malog dometa u odnosu na vozila na fosilna goriva potrebno je postavljanje razgranate i rasprostranjene mreže punionica za PEV automobile (Slika 6.).



Slika 6. Punjenje električnog automobila u Zagrebu

2.2 Pametna rasvjeta

Javna rasvjeta u prosjeku predstavlja 10 do 20 % cjelokupne energetske potrošnje države (taj postotak je i veći u državama u razvoju) [8]. Ovaj skup energetske mjere podrazumijeva zamjenu tradicionalne javne, ali i kućne, rasvjete tehnološki naprednom pametnom rasvjetom čija je glavna odlika prilagođavanje trenutnim potrebama za svjetlom. Tako, na primjer, tradicionalna rasvjetna tijela daju isti intenzitet svjetlosti, odnosno troše istu količinu energije, bez obzira na to ima li u blizini pješaka, automobila ili biciklista kojima su potrebna, dok se pametna rasvjeta prilagođava trenutnim potrebama gradirajući intenzitet svjetlosti i utrošenu energiju ovisno o potrebi. Ukoliko senzor uoči nailazak nekog objekta rasvjeta će zasvijetliti jače, a u slučaju nepostojanja potrebe će se prigušiti.

Također, pametna rasvjeta u slučaju kvara automatski dojavljuje problem u kontrolni centar gdje se lako može očitati koje je rasvjetno tijelo prestalo s radom.

Integracijom sustava pametne rasvjete u koncept pametnog grada se uz uštedu energije povećava i sigurnost stanovništva što je jedna od sekundarnih zadaća ovakvog koncepta gradskih naselja.

Uz to, česta je i primjena solarnih ćelija za napajanje rasvjetnih tijela. Danju se pomoću PV (eng. photovoltaic) ploča napaja baterija koja pruža potrebnu energiju za noćnu rasvjetu čime se smanjuje emisija štetnih plinova kod proizvodnje potrebne električne energije.

2.3 Toplinski i rashladni sustavi

Veliki moderni gradovi imaju veliku potrebu za toplinskom, odnosno rashladnom energijom tijekom cijele godine. U zimskim mjesecima domove, tvornice i radne prostore potrebno je grijati, dok se u ljetnim mjesecima toplinska ugodnost postiže hlađenjem tih prostora.

Stoga je u većini gradskih naselja, pa tako i u gradu Zagrebu, uveden centralizirani toplinski sustav, odnosno sustav daljinskog grijanja. Prema hrvatskom Zakonu o tržištu toplinske energije centralizirani toplinski sustav (CTS) je toplinski sustav koji putem vrelovodne, toplovodne i parovodne mreže duže od 2000 metara povezuje obračunska mjerna mjesta za preuzimanje toplinske energije od proizvođača do obračunskog mjernog mjesta za prodaju toplinske energije kupcima [9].

CTS sam po sebi ne predstavlja pametnu mjeru pošto je, u starijim generacijama, energija proizvedena iz fosilnih goriva, a transportni i ostali gubici znatni. Kako bi centralizirani toplinski sustav spadao pod mjere pametnih gradova važno je da barem djelomično energiju proizvodi pomoću dizalica topline, a poželjno bi bilo da spada u CTS sustave četvrte generacije koji za funkciju imaju opskrbu zgrada i stanova niskotemperaturnim grijanjem,

minimizaciju energetske gubitaka, iskorištavanje niskotemperaturnih izvora otpadne topline, omogućavanje integracije obnovljivih izvora energije te povezivanje elektroenergetskog i toplinskog sustava.

I) Integrirani centralizirani toplinski i rashladni sustav (eng. District heating and cooling system)

Premda se centralizirani sustav grijanja koristi još od 1880-ih godina te je već postao standard u gradovima diljem svijeta, primjena centraliziranog sustava hlađenja još uvijek nije u potpunosti zaživjela u svim većim gradovima pa se stoga može smatrati jednom od tehnoloških mjera pametnih gradova.

Rashladni agregati koji se koriste kod centraliziranih rashladnim sustavima imaju puno veći koeficijent učinkovitosti (COP)³ (čak i do 7) od tradicionalnih rashladnih decentraliziranih klima-uređaja koji su veliki potrošači energije (COP između 2 i 4) što automatski znači uštedu energije. Sveukupno, centralizirani sustavi grijanja i hlađenja mogu uštedjeti između 30 i 50 % primarne energije [10].

II) Korištenje dizalica topline i otpadne topline iz kanalizacije

Jedan od energetski prihvatljivih niskotemperaturnih izvora za grijanje vode u cijevima centraliziranog sustava je otpadna toplina iz kanalizacije.

Otpadna voda u kanalizaciji je prosječne temperature između 10 i 20 °C (15.6 °C je prosječna temperatura kanalizacije u SAD-u) što predstavlja veliki toplinski potencijal koji se može iskoristiti dizalicama topline [11].

Dizalice topline koriste geotermalnu energiju iz zemlje, toplinsku energiju podzemnih voda ili zraka te preko sustava grijanja prenose toplinu u stambeni prostor.

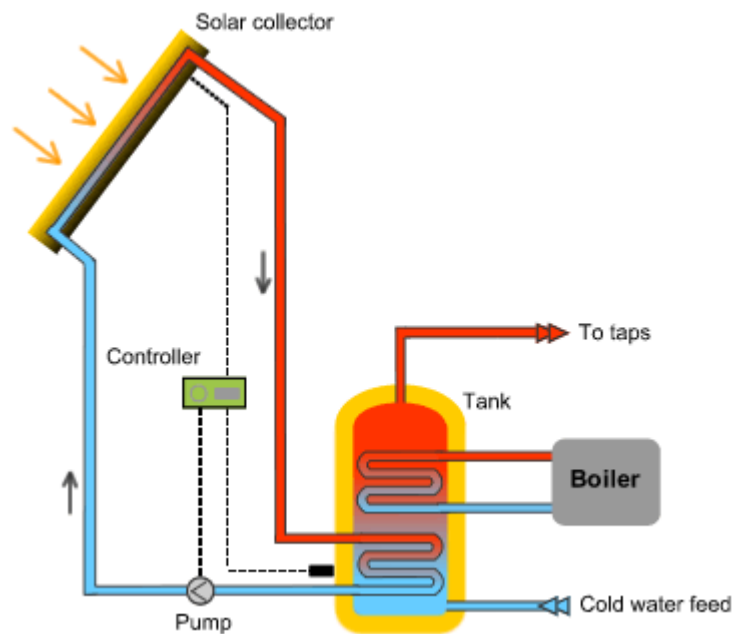
³ COP (eng. Coefficient of Performance) predstavlja omjer korisne topline grijanja i hlađenja u odnosu na uloženi rad

III) Solarni toplinski kolektori

Solarni toplinski kolektor prikuplja toplinu apsorbirajući Sunčevu svjetlost.

Konstruktivski postoji veći broj izvedba solarnih kolektora, a najveća razlika je u geometriji pa tako nailazimo na ravne solarne kolektore (u obliku ploče), cijevne solarne kolektore ili tanjuraste (parabolične) kolektore.

Na Slici 7. prikazana je shema solarnog kolektora.



Slika 7. Shema solarnog toplinskog kolektora [12]

Solarni kolektori koriste se za zagrijavanje vode te stoga mogu biti ukomponirani u centralizirani sustav grijanja nekog grada kao obnovljivi izvor energije što dodatno smanjuje štetne emisije cijelog sustava.

2.4 Solarne fotonaponske elektrane

Fotonaponske elektrane (Slika 8.) jedan su od najboljih načina za iskorištavanje Sunčeve energije. Sastoje se od mreže fotonaponskih modula (PV – Photo Voltaic) koji koriste fotoelektrični efekt kako bi Sunčevu energiju pretvorili direktno u električnu. Fotoni iz sunčeve svjetlosti pogađaju module te izbijaju negativno nabijene elektrone koji se, zbog polarizacijski građenih panela, počinju kretati prema drugoj strani modula stvarajući električnu energiju. Zatim se tako prikupljena električna energija uz pomoć invertera prilagođava mrežnim parametrima te uključuje u elektroenergetsku mrežu grada.



Slika 8. Solarna fotonaponska (PV) elektrana [13]

3. PRIMJERI PAMETNIH GRADOVA

3.1 Europska unija (EU – 28)

Europska Unija, uz Sjedinjene Američke Države i Indiju, predstavlja najrazvijenije područje na svijetu po pitanju pametnih gradova.

Vladajuća tijela Europske unije na čelu s Europskom komisijom i INEA-om (eng. Innovation and Networks Executive Agency) promiču i financijski podupiru razvoj novih i unapređenje već postojećih pametnih zajednica pa je tako od 2014. godine na snazi program Horizon 2020 koji, između ostalog, pruža mogućnosti financiranja strategija razvoja pametnih gradova u okviru budžeta EU. Program europske pametne gradove dijeli u kategorije svjetionika i pratitelja – gradovi svjetionici već imaju razvijen program pametnog grada dok gradovi pratitelji imaju za cilj taj program „kopirati“ odnosno prilagoditi svojim uvjetima [14].

Također, u okviru europske zajednice djeluje i EIP – SCC (European Innovation Partnership on Smart Cities and Communities) čiji je cilj poticati razvoj pametnih gradova među građanima, industrijom, financijskim ustanovama i drugim važnim dionicima kroz šest akcijskih područja (eng. action clusters): fokus građana, poslovni modeli, financije i nabava, integrirana infrastruktura i procesi, integrirano planiranje, politika i regulacije, održive četvrti i izgrađenost okoliša, održiva urbana mobilnost [15].

U nastavku slijedi pobliži opis tri izabrana istaknuta pametna grada svjetionika iz EU-28 zajednice: Barcelone, Amsterdama i Pariza.

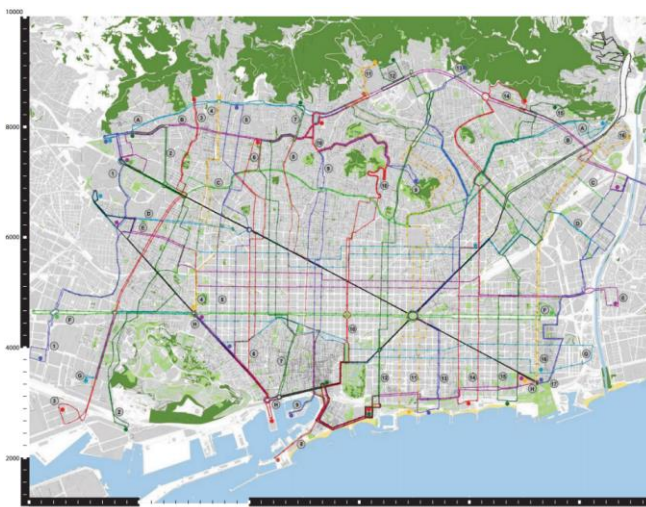
I) Barcelona

Barcelona kotira kao najuspješniji pametni grad na europskom tlu – prema istraživanju Juniper Research-a iz 2016. godine proglašena je drugim najboljim pametnim gradom na svijetu, odmah iza „pametnog grada-države“ Singapura [16].

Promet je jedno od glavnih područja primjene pametnih tehnologija u Barceloni koja se posebno istaknula optimizacijom javnog gradskog prijevoza.

Pomoću digitalnih sustava za prikupljanje podataka o prometnim tokovima, ured za promet Barcelone preoblikovao je mrežu gradskih linija koristeći uglavnom vertikalne, horizontalne i dijagonalne trase s mnogo stanica i presjecišta (Slika 9.).

Tim potezom došlo je do ubrzanja javnog gradskog prijevoza, smanjenja čekanja u prometnim zastojevima, a samim time i do manje potrošnje goriva te posljedično manjih emisija štetnih plinova.



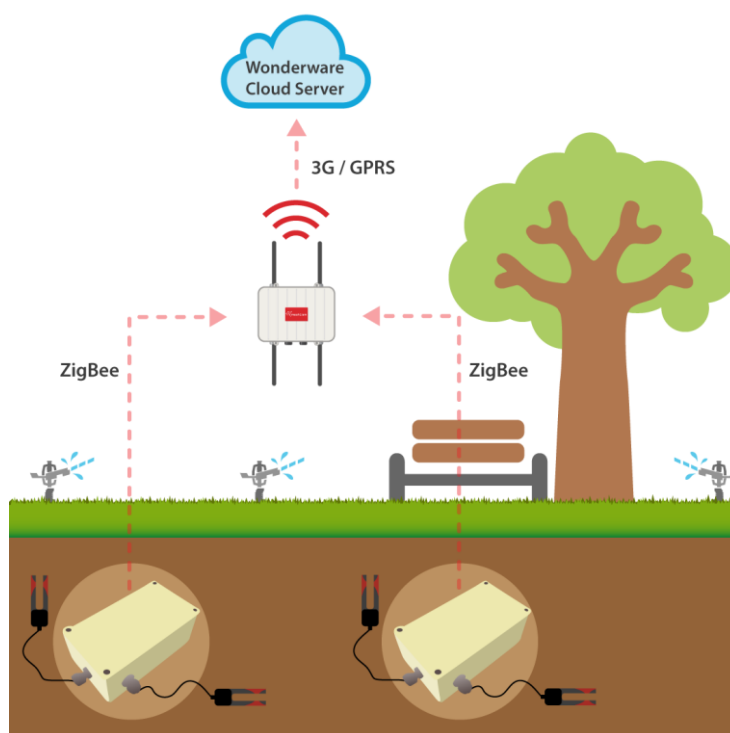
Slika 9. Nova autobusna mreža Barcelone [17]

Osim novog dizajna autobusnih linija, gradski ured za planiranje nedavno je predstavio i kompletno novi prometni plan za cijeli grad koji bi trebao smanjiti vrijeme čekanja u prometnim gužvama za 21 %. Nadalje, velika većina grada već je dulje vrijeme opremljena pametnim parkirnim mjestima sa senzorima te pametnom LED rasvjetom koja, između ostalog, omogućuje i besplatan Wi-Fi internetsku vezu svim građanima i posjetiteljima. Razvijena je i inovativna tehnologija solarne rasvjete koja u sebi ima ukomponirane različite pametne

dotatke (senzori za pokret, senzori za kontrolu kvalitete zraka ili zagađenja, Wi-Fi), ovisno o potrebama mjesta gdje se rasvjeta postavlja.

Velika pozornost pridaje se i kvaliteti zraka pa su tako diljem urbanog središta postavljeni i senzori koji nadziru kakvoću zraka i razinu buke. Barcelona se pametnim mjerama služi i u „borbi“ protiv suše. Diljem gradskih parkova u zemlju su postavljeni senzori koji prate količinu padalina te, zajedno sa podacima o predviđenoj količini kiše u narednih nekoliko dana, reguliraju razinu zalijevanja biljaka i travnjaka iz prskalice. U slučaju smanjene količine oborina prskanje zelenih površina prestaje te se voda čuva za osnovne potrebe građanstva.

Na Slici 10. prikazana je veza pametnih prskalica s bazom podataka.



Slika 10. Povezanost sustava pametnih prskalica s bazom podataka [7]

II) Amsterdam

Jedan od preduvjeta za implementaciju mjera pametnih gradova svakako je prikupljanje podataka vezanih uz relevantne gradske aktivnosti čijom se onda analizom utvrđuju potrebna tehnološka rješenja.

Upravo je u tom području Amsterdam grad svjetionik u Europskoj Uniji – glavni grad Nizozemske ima javno dostupnu bazu podataka (City Data) gdje se zainteresirani građani mogu informirati o stanovništvu, prometu, infrastrukturi, zdravstvu, energetske tokovima itd. vezanim uz njihov dio grada ili uz cijeli grad općenito [18].

Razvoj pametnog grada potaknut je 2009. godine osnivanjem „Amsterdam Smart City Initiative“ čiji je cilj promoviranje i objedinjavanje ideja koje će grad učiniti još bližim idealnom modelu pametnog grada. Inicijativa na svojim internetskim stranicama nudi pregledan i interaktivan popis svih pametnih projekata u gradu podijeljenih u nekoliko kategorija ovisno o području gradskog života na koji se odnose (energetika, digitalni grad, mobilnost, građanstvo itd.) [19].

Kako je Amsterdam grad izgrađen na sustavu kanala i mostova, jedan od ekoloških problema grada leži u onečišćenju samih kanala. Plastika je, zbog svog svojstva dugotrajne, pa gotovo i nemoguće razgradivosti u okolišu, prepoznata kao jedan od glavnih onečišćivača amsterdamskog vodnog puta. Stoga je, u sklopu tehnološkog rješenja pametnih gradova, predstavljena inovativna metoda pod nazivom „Great Bubble Barrier“ (hrv. Velika mjehurićasta barijera). Ideja je u samoj svojoj izvedbi veoma jednostavna – na dno kanala postavlja se cijev s rupama kroz koju se potom upuhuje zrak koji onda svojim prodiranjem na površinu stvara mjehurićastu barijeru čiji je cilj sprječavanje prolaska plastičnog otpada (Slika 11.). Cijeli koncept je jeftin i lako primjenjiv te je stoga naišao na plodno tlo diljem kanalskog sistema. Daljnji razvitak ideje uključuje korištenje prikupljenih plastičnih otpadaka kao sirovine za 3D plastični printer.



Slika 11. Jednostavna shema mjehurićaste barijere [19]

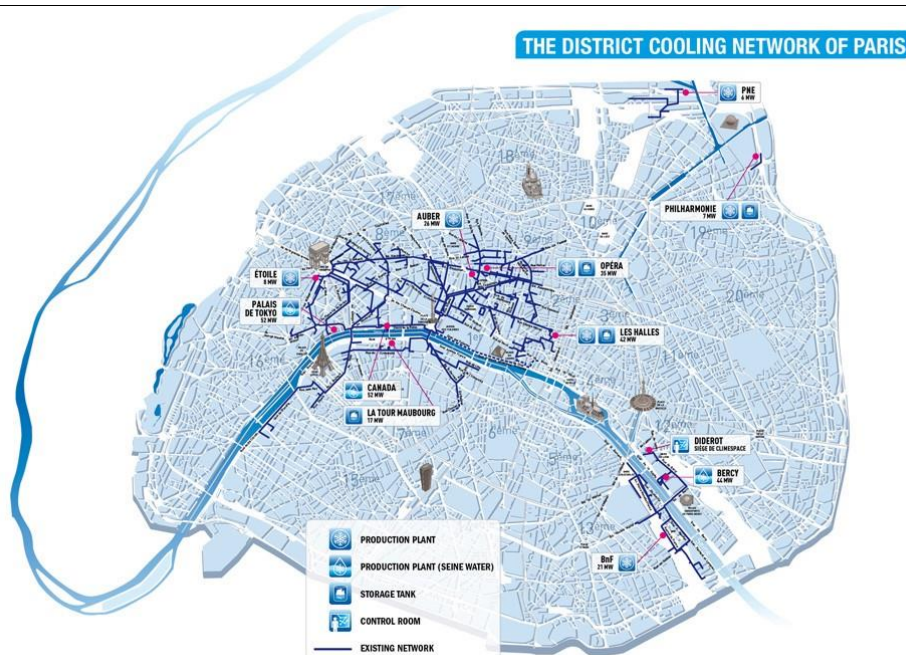
III) Pariz

Glavni grad Francuske je jedan od svjetskih pionira kad je u pitanju korištenje centraliziranog daljinskog sustava grijanja i hlađenja (eng. district heating and cooling systems) koji, ukoliko zadovoljava određene uvjete (korištenje dizalica topline i obnovljivih izvora energije, niski gubici, mogućnost niskotemperaturnog grijanja), predstavlja jednu od energetski najkorisnijih metoda iz skupa tehnoloških mjera pametnih gradova.

CTS u Parizu obuhvaća mrežu od 475 kilometara koja čak 50 % energije crpi iz obnovljivih izvora energije [20]. Najveći udio u postotku ima korištenje otpadne topline koja se pomoću dizalica topline integrira u vrelovodni sustav (39 %) te čak 36 geotermalnih izvora topline. Također, iako je sustav baziran na protoku vruće pare kroz cijevi, njegova specifičnost leži u 19 petlji tople vode (eng. hot water loops) koje opskrbljuju manje gradske četvrti ili postrojenja, a s glavnim sustavom povezane su pomoću izmjenjivača topline. Prednost petlji leži u boljoj distribucijskoj učinkovitosti koja se penje do čak 95 %. Isto tako, topla voda ima bolja svojstva skladištenja topline od pare (veći toplinski kapacitet) pa petlje reduciraju potrebu korištenja fosilnih goriva prilikom vrhunca potražnje za grijanjem (eng. peak demand) [20].

Osim sustava centraliziranog grijanja, Pariz ima dobro razvijen i sustav centraliziranog hlađenja koji opskrbljuje 500 000 kućanstava [20]. Njegova mreža od 71 km pod nazivom „Climespace“ (Slika 12.) predstavlja najveću mrežu daljinskog sustava hlađenja u Europi koja broji oko 570 potrošača. Sustav se sastoji od velike mreže u centru grada te dvije zasebne manje mreže na sjevero-istočnom i jugo-zapadnom dijelu. „Climespace“ čak 60 % mreže provodi kroz već postojeće kanalizacijske sustave što minimalizira potrebu za novom infrastrukturom.

Što se veličine cijelog sustava tiče, on se sastoji od devet centara za proizvodnju hladne vode ukupne snage od 330 MW koji godišnje proizvedu 412 GWh rashladne energije [20]. Potrebna energija proizvodi se pomoću rashladnih agregata, a veliku uštedu energije stvara i uzimanje već djelomično rashladene vode iz rijeke Senne na koju su spojena tri proizvodna postrojenja ukupne veličine od 148 MW. Prosječna temperatura rashladnog medija iznosi 4 °C, a povratna temperatura doseže čak 14 °C.



Slika 12. Mreža centraliziranog sustava hlađenja u Parizu [20]

Osim centraliziranih sustava grijanja i hlađenja, pariške vlasti su nedavno predstavile i projekt „Paris Smart City 2050“ koji teži k smanjenju emisija stakleničkih plinova za 75 % do 2050. godine. Jedan od načina ostvarenja tog ambicioznog poduhvata predstavila je francuska arhitektonska kuća „Vincent Callebaut Architectures“. Njihov model temelji se na gradnji visokih, energetskih pozitivnih zgrada koje bi bile sposobne proizvoditi energiju za okolne, susjedne objekte. Idealan tip energetski pozitivnih zgrada predstavljaju one koje uspiju iz obnovljivih izvora energije proizvesti više energije nego što troše na osiguravanje ugodnog boravka u njima. Osam futurističkih modela građevina (Slika 13.) trebalo bi pokušati riješiti problem toplinskih otoka⁴ u gradovima te pomoći razvoju Pariza prema konceptu održivog razvoja.



Slika 13. Anti-smog tornjevi – jedan od osam modela energetski pozitivnih zgrada [21]

⁴ Toplinski otok je gradsko područje koje je znatno toplije od okolnih ruralnih područja, a uzrokovan je ljudskim djelovanjem (gustoćom zgrada, promet, smanjenje prirodne ventilacije itd.)

3.2 Republika Hrvatska

Republika Hrvatska, članica Europske unije od 2013. godine, u području primjene tehnologija pametnih gradova još uvijek nije dosegla razinu ostalih članica.

Tako unutar granica RH postoji 128 gradskih naselja, od kojih, prema istraživanju Zavoda za gradski promet Fakulteta prometnih znanosti u Zagrebu [22], samo njih 40-ak primjenjuje tehnologije pametnih gradova. Rješenja novih tehnologija najbolje su primijenjena u području mobilnosti gdje već duže vrijeme građani hrvatskih gradova mogu koristiti usluge javnih bicikala, dijeljenja automobila, vožnje na zahtjev ili praćenja i plaćanja javnog gradskog prijevoza putem neke od aplikacija na pametnim telefonima.

Prvih korak u unapređenju korištenja pametnih tehnologija na hrvatskom tlu svakako je donošenje strategija o razvoju pametnih gradova, kakvu je primjerice donio glavni grad Zagreb. Jasnom vizijom i planom napretka hrvatski gradovi imaju priliku dostići europske susjede te tako postati dijelom novog, održivog društva budućnosti.

U nastavku su nabrojani neki od projekata pametnih gradova u Hrvatskoj, s naglaskom na Grad Zagreb.

I) Koprivnica

Jedan od predvodnika razvoja strategija pametnih gradova u Hrvatskoj je grad Koprivnica. Koliko je Koprivnica uspješna u svom nastojanju implementacije pametnih rješenja govori činjenica da je ona prvi grad u regiji te tek sedmi na prostoru Europe kojemu je dodijeljen ISO certifikat broj 37120: „Održivi razvoj – indikatori za gradske službe i kvalitetu života“. Certifikat najviše kategorije Platinum je pokazao kako je Koprivnica uspješna u mjerenju 46 osnovnih i 48 pomoćnih indikatora od ukupno 100 mjerljivih iz 17 područja relevantnih za život grada.

Precizna mjerenja omogućila su gradu razvoj pametnih tehnologija koje će povećati životnu ugodnu građanima, poboljšati učinkovitost rada gradskih službi, smanjiti zagađenje okoliša te izdatke gradskog budžeta istovremeno približavajući Koprivnicu modernom samoodrživom gradu.

Jedno od tehnološki naprednih rješenja koje je svoju primjenu našlo upravo u Koprivnici je model elektronskog računa pod skraćenicom EBPP (eng. Electronic Bill Presentment and Paying). Usluga namijenjena tvrtkama koji izdaju velik broj računa različitim klijentima omogućuje zamjenu klasičnog papirnatoг računa elektroničkim oblikom. Time se ostvaruje ušteda na troškovima tiskanja i printanja računa, ali i smanjuje zagađenje okoliša uzrokovano korištenjem velike količine papirnatе sirovine.

U Koprivnici se koristi i tehnologija pametnog sustava elektronske evidencije odvoza komunalnog otpada. Rješenje omogućuje naplatu odvoza prema volumenu i broju sakupljanja ili masi otpada, a sastoji se od kontejnera s RFID⁵ čipovima (Slika 14.), sustava za automatsku identifikaciju te cloud aplikacije za obradu podataka.

Osim ovih dvaju inovativnih rješenja, Koprivnica posjeduje i usluge korištenja javnih bicikala te pametne klupe koje građanima pružaju besplatnu internetsku vezu diljem središta grada.



Slika 14. Kontejneri s RFID čipovima [23]

⁵ RDIF (Radio Frequency Identification) je tehnologija koja koristi radio vezu za komunikaciju između prijenosnih uređaja i glavnog (host) računala

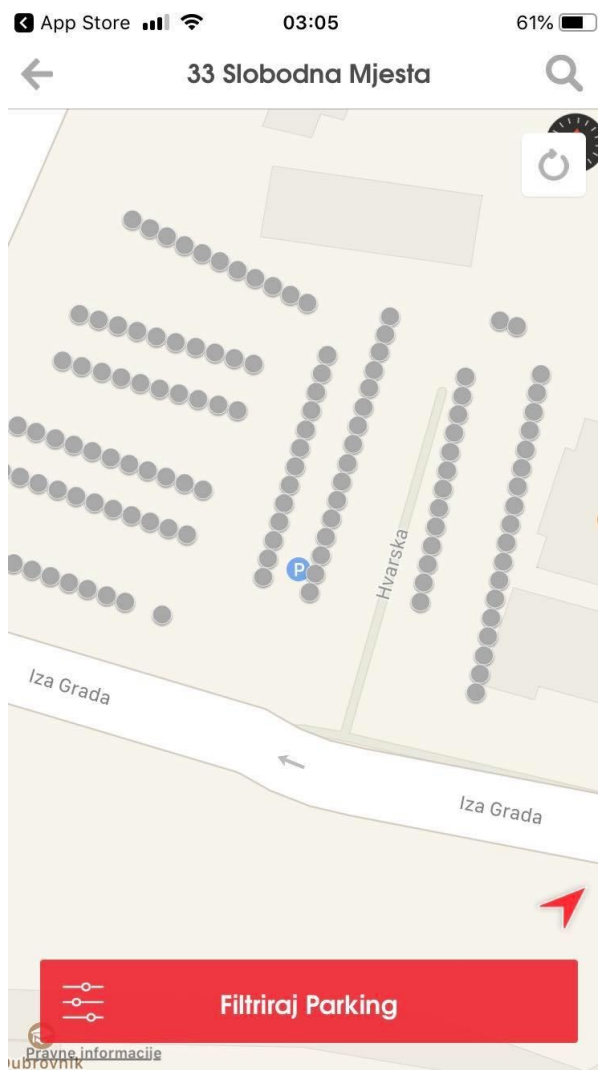
II) Dubrovnik

Jedan od pametnih projekata u gradu je aplikacija „Smart Parking“ koja, preko pametnih mobilnih telefona, olakšava građanima Dubrovnika i njihovim gostima parkiranje.

Aplikacija korisniku prezentira interaktivnu mapu praznih i popunjenih mjesta na parkiralištima, kao i podatke o cijeni i uvjetima parkiranja.

Isto tako, moguća je i navigacija klijenta do slobodnog mjesta.

Slika 15. prikazuje sučelje aplikacije „Smart Parking“.



Slika 15. Sučelje aplikacije „Smart Parking Dubrovnik“

Dubrovnik se, slično kao i Barcelona, okrenuo pametnim tehnologijama i u slučaju navodnjavanja zelenih površina pa je tako u gradu u tijeku postavljanje senzora koji bi prema temperaturi i vlažnosti tla regulirali zalijevanje parkova.

III) Zadar

Grad Zadar je također počeo s razvitkom tehnologija pametnih gradova.

Strategija uključuje implementaciju dosad već poznatih tehnologija kao što su pametna rasvjeta, besplatna internetska mreža, pametno parkiranje te „Portal City“ aplikacija koja bi nudila svojevrstan pregled pametnog grada - omogućavala bi korisnicima da na jednom mjestu vrše plaćanje različitih komunalnih usluga kao što su parking, javni prijevoz, taxi prijevoz, ulaz u muzeje, ali i davala im informacije o kakvoći zraka, temperaturi mora, prometnom stanju itd.

Projekt s kojim se Zadar ističe među drugim hrvatskim gradovima je postavljanje takozvanih pametnih govornica po uzoru na New York i London (Slika 16.). Govornice, osim telefoniranja, korisnicima omogućuju kupovinu karata za parking te javni gradski prijevoz, besplatno korištenje Wi-Fi mreže, kao i dobivanje korisnih informacija o samom gradu.



Slika 16. Pametne govornice u Zadru [24]

IV) Zagreb

Glavni grad Republike Hrvatske zbog svoje veličine, odnosno činjenice da sa prigradskim naseljima obuhvaća više od milijun stanovnika što predstavlja četvrtinu stanovništva države, te ekonomskog i sociološko-kulturnog značaja predstavlja velik potencijal za primjenu naprednih tehnoloških mjera pametnih gradova.

Važan korak u razvoju grada Zagreba kao pametnog grada predstavlja projekt donošenja jedinstvene Strategije razvoja pametnog grada odnosno Zagreb Smart City strategije. Ta se strategija nameće kao nastavak Akcijskog plana energetske održivosti razvoja Grada Zagreba koji je donesen 2010.g.

Novom strategijom se prioritet razvoja pametnog Grada Zagreba stavlja na četiri osnovne kategorije (od kojih je svaka podijeljena na više sektora) [25]:

1. kvaliteta života
2. gospodarstvo
3. upravljanje i informiranje te
4. zaštita okoliša i borba protiv klimatskih promjena,

a u svrhu ostvarenja vizije pametnog grada definirano je i šest strateških područja:

- Razvoj digitalne infrastrukture
- Učinkovita, transparentna i pametna gradska uprava
- Pametno upravljanje energijom
- Obrazovanje
- Gospodarstvo – pametna rješenja za tvrtke
- Održiva urbana mobilnost

Strategija razvoja pametnog Grada Zagreba sadrži ukupno 27 mjera koje bi se trebale primijeniti na navedenih šest područja, a neki od konkretnih primjera su:

- Platforma za naprednu vizualizaciju, interpretaciju i statističku analizu planiranja, izgradnje i eksploatacije digitalne infrastrukture (platforma za agregaciju podataka trebala bi biti temeljena na konceptu integrirane platforme koja će omogućiti prikupljanje, pohranu, obradu i dijeljenje podataka iz svih važnih sektora među svim dionicima pametnog grada – nešto slično amsterdamskoj City Dana platformi)
- Gigabitna širokopojasna korisnička infrastruktura (implementacija mjera pametnog grada zahtjeva robusnu, pouzdanu i pristupačnu širokopojasnu mrežu)

- Ubrzanje razvoja digitalnih javnih usluga i povećanje apsorpcije digitalnih tehnologija u gradskoj upravi Grada Zagreba
- Pametna električna mreža (elektroenergetski sustav koji inteligentno integrira i koordinira radnje svih korisnika priključenih na sustav – proizvođača, opskrbljivača i potrošača, a s ciljem održive, ekonomski isplative, ekološki prihvatljive i sigurne opskrbe električnom energijom na području grada)
- Pametni CTS (uz smanjenje emisija CO₂ te povećanje energetske učinkovitosti, krajnjim se korisnicima nastoji osigurati i minimum gubitaka, pravilna raspodjela potrošnje te plaćanje po stvarnoj potrošnji)
- Uvođenje suvremenih ICT-a u osnovne i srednje škole (cilj je povećanje digitalne pismenosti, kvalitete i učinkovitosti procesa učenja te stvaranje jednakih mogućnosti za sve učenike osnovnih i srednjih škola)

4. ENERGETSKO MODELIRANJE GRADA ZAGREBA

Energetsko modeliranje grada Zagreba provedeno je u računalnom programu EnergyPLAN s ciljem ispitivanja utjecaja određenih pametnih mjera na energetske sektor grada Zagreba.

Najprije je izrađen referentni model grada te su zatim implementirane mjere:

- pametnog parkiranja,
- pametne javne rasvjete,
- integracije centraliziranog toplinskog i rashladnog sustava s mogućnošću korištenja kanalizacijskog sustava kao izvora otpadne topline, solarnih toplinskih kolektora te dizalica topline,
- integracije solarnih fotonaponskih elektrana (PV) te
- integracije električnih vozila.

Zatim je provedena scenarijska analiza navedenih mjera s obzirom na:

- kritični višak proizvodnje električne energije (eng. CEEP – Critical excess electricity production),
- ukupnu cijenu provedbe scenarija,
- emisije CO₂ te
- uvoz/izvoz električne energije.

4.1 EnergyPLAN

EnergyPLAN je računalni program koji simulira ponašanje energetskih sustava nekog grada, regije ili države na satnoj osnovi.

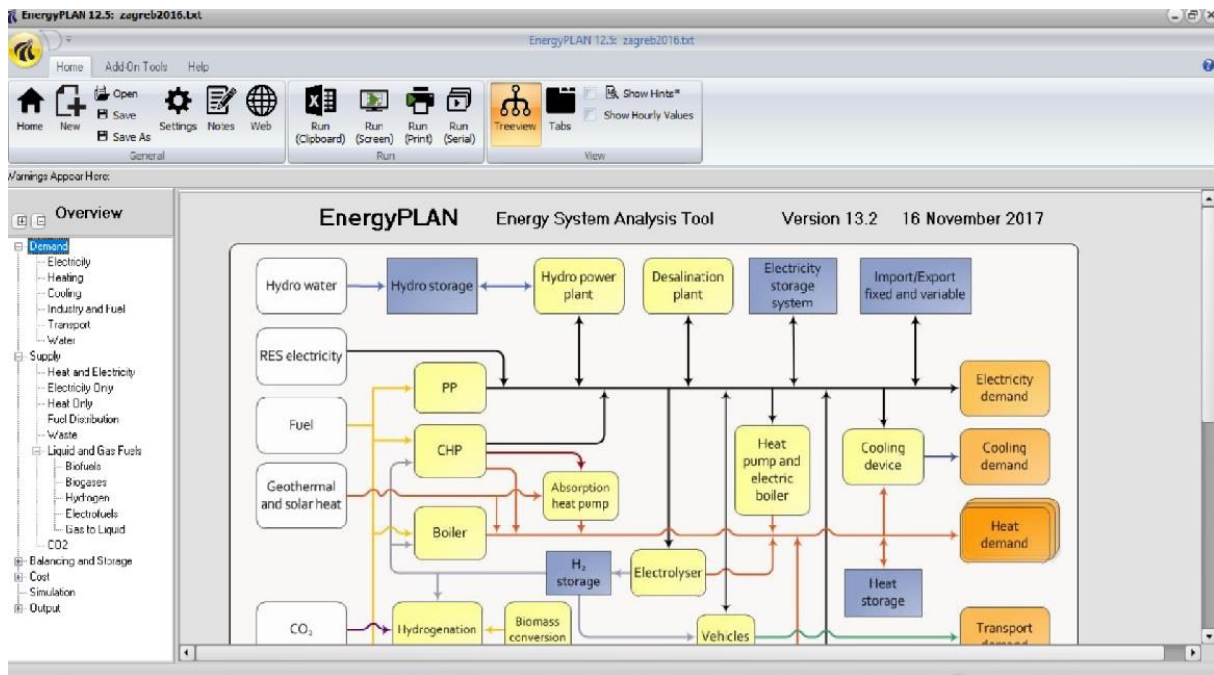
Riječ je o determinističkom sustavu koji na osnovu mnogobrojnih potrebnih ulaznih podataka prikazuje određene izlazne podatke.

Za izradu modela u program je potrebno unijeti ulazne podatke o ukupnoj potražnji za električnom energijom te satnoj distribuciji potražnje. Ukupnu potražnju potrebno je raspodijeliti po sektorima. Potrebno je navesti vrstu i snagu instaliranih kapaciteta za proizvodnju električne energije iz konvencionalnih i obnovljivih izvora, mogućnosti skladištenja energije, satnu krivulju proizvodnje energije iz obnovljivih izvora te vrstu korištenog goriva kod neobnovljivih izvora. Moguć je i unos različitih vrsta regulacije te uvrštavanje cijene električne energije kako bi se analizi moglo pristupiti i s ekonomskog aspekta.

Na izlaznoj strani programa očitavaju se energetske bilance sustava, satna proizvodnja energije iz određenog izvora, CEEP u sustavu, ukupni troškovi sustava, potrošnja goriva, emisije CO₂ itd.

EnergyPLAN je razvijen od strane danskog Sveučilišta u Aalborgu, no svoju primjenu naišao je diljem svijeta te je čest alat u energetske case-study slučajevima. Posebno je koristan prilikom analize integracije obnovljivih izvora energije u elektro-energetski sustav nekog područja.

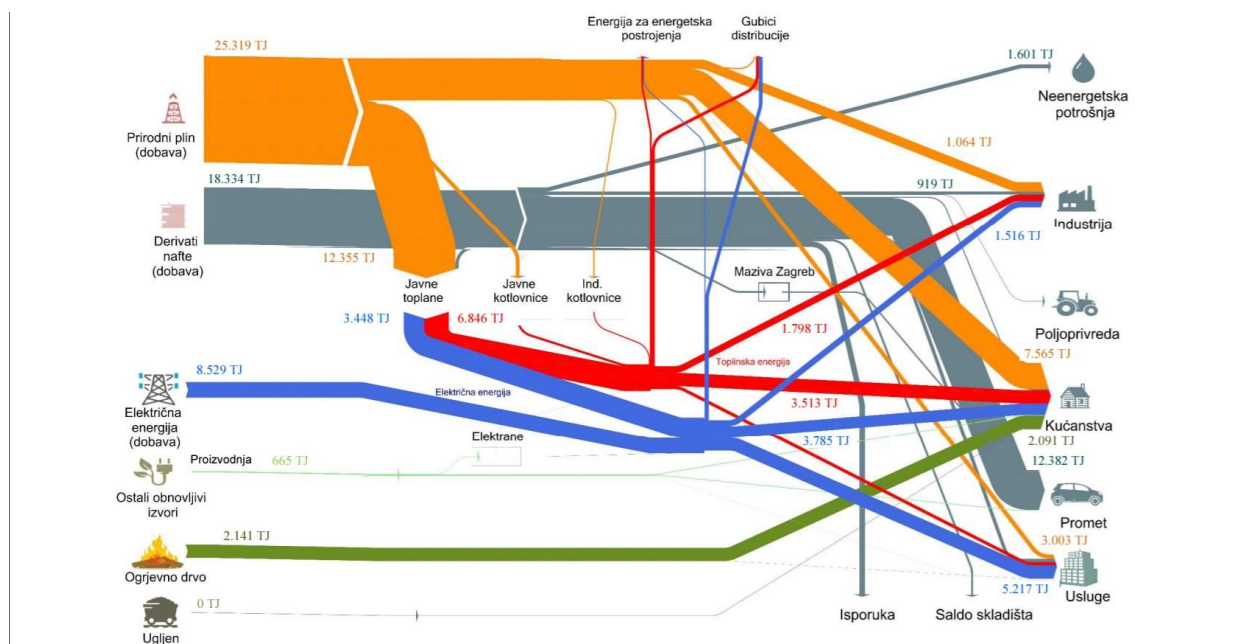
Slika 17. prikazuje sučelje računalnog programa EnergyPLAN.



Slika 17. Sučelje računalnog programa EnergyPLAN – verzija 2017.

4.2 Referentni model

Referentni model za grad Zagreb je, zbog dostupnosti podataka, izrađen za 2016. godinu. Za tu je godinu Energetski institut Hrvoje Požar izradio energetske bilance za grad Zagreb koja e poslužila kao osnovna baza podataka za izradu modela [26]. Shema bilance prikazana je na Slici 18.



Slika 18. Shematski prikaz toka energetske bilance Grada Zagreba za 2016. godinu [26]

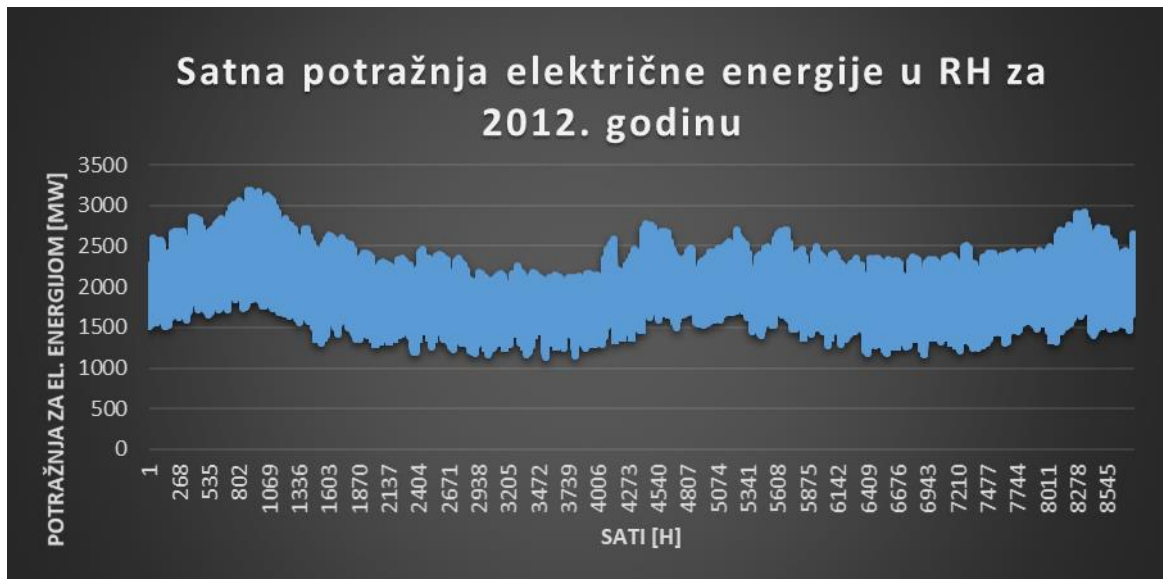
U rubrici potražnje (eng. demand) uneseni su podaci za:

1. potrošnju električne energije
2. potrošnju toplinske energije
3. potrošnju kućanstava i uslužnog sektora
4. potrošnju industrije te
5. potrošnju u transportu.

1. Potrošnja električne energije

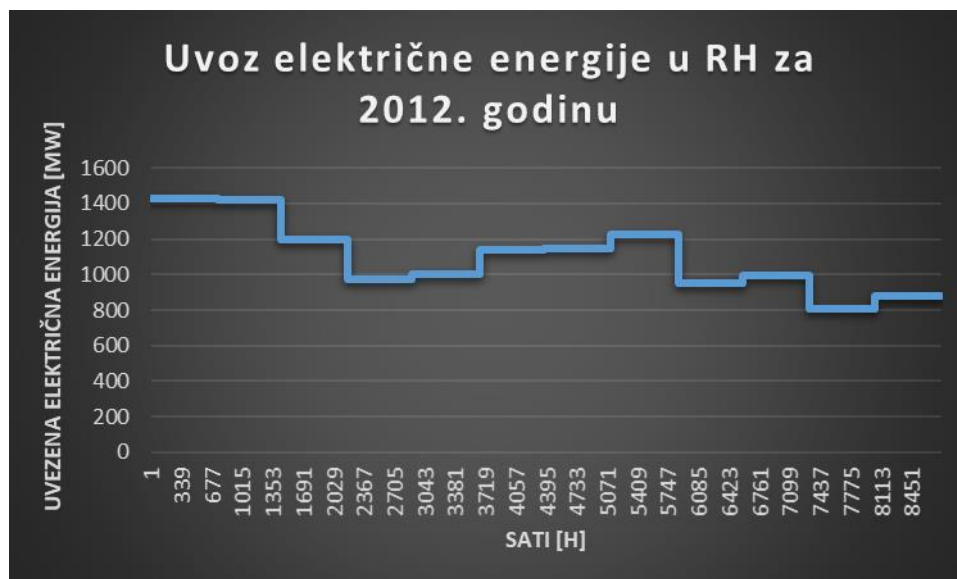
Prema energetske bilanci za 2016. godinu [26] neposredna potrošnja električne energije u Gradu Zagrebu iznosila je 3,016 TWh. Od toga se u gradsku mrežu uvozom dobavilo 2,37 TWh, dok se ostatak proizvodi transformacijama primarnih oblika energije iz konvencionalnih goriva ili iz obnovljivih izvora energije.

Satna krivulja potrebe za električnom energijom uzeta je na razini Republike Hrvatske za 2012. godinu (Slika 19.) pod pretpostavkom da se ona nije značajno mijenjala u naredne četiri godine.



Slika 19. Satna potražnja električne energije u RH za 2012. godinu

Prilikom odabiranja satne distribucije uvoza električne energije također je odabrana distribucija za RH iz 2012. godine (Slika 20.).



Slika 20. Satna distribucija uvoza električne energije u RH za 2012. godinu

2. Potrošnja toplinske energije

Nakon električne energije, druga najzastupljenija stavka u neposrednoj potrošnji energetskeg sustava Grada Zagreba (Tablica 1.) jest toplinska energija koja se proizvodi u dvama kogeneracijskim postrojenjima.

Ukupna toplinska energija kombinirano proizvedena u tim dvama postrojenjima iznosi 1,755 TWh sati godišnje [26].

Tablica 1. Neposredna potrošnja energije u Gradu Zagrebu [26]

	Jedinica	2016.	2016.	
			TJ	%
Prirodni plin	10 ⁶ m ³	337,5	11.772	25,5%
Ogrjevno drvo	10 ³ m ³	237,9	2.141	4,6%
Ostali obnovljivi	TJ	281	281	0,6%
Derivati nafte	10 ³ t	342,4	14.846	32,1%
Toplinska energija	TJ	6315,5	6.316	13,7%
Električna energija	GWh	3015,9	10.857	23,5%
UKUPNO			46.213	100,0%

Što se tiče hlađenja, centralizirani sustav na području Grada Zagreba ne postoji, dok se individualne potrebe uglavnom zadovoljavaju klima uređajima koji za svoj pogon koriste električnu energiju. Stoga je energija potrebna za hlađenje prikazana u potražnji za električnom energijom.

3. Potrošnja kućanstava i uslužnog sektora

Računalni program EnergyPLAN nema posebnu rubriku za upisivanje potrošnje sektora usluga te je potrošnja tog sektora morala biti pridodana potrošnji kućanstava.

Izuzme li se CTS, ostatak potrebe za toplinskom energijom kućanstava s individualnim grijanjem zadovoljava se pomoću plina (2,14 TWh), biomase (0,622 TWh) te derivata nafte (0,0544 TWh) [26]. Detaljna potrošnja po energentima prikazana je u Tablici 2.

Tablica 2. Neposredna potrošnja energije u kućanstvima [26]

	Jedinica	2016.	2016.	
			TJ	%
Prirodni plin	10 ⁶ m ³	216,9	7.565	43,1%
Ogrjevno drvo	10 ³ m ³	232,3	2.091	11,9%
Energija Sunca	TJ	94,7	95	0,5%
Ostala biomasa	TJ	147,6	148	0,8%
Ukapljeni plin	10 ³ t	3,0	141	0,8%
Ekstralako lož ulje	10 ³ t	4,6	196	1,1%
Toplinska energija	TJ	3.513,1	3.513	20,0%
Električna energija	GWh	1.051,4	3.785	21,6%
UKUPNO			17.534	100,0%

Što se uslužnog sektora tiče, izuzmemo li prije evidentiranu potrošnju električne i toplinske energije, najzastupljeniji energent je plin s 0,898 TWh, a slijede ga derivati nafte (0,235 TWh) te biomasa (0,0167 TWh) [26]. Detaljna potrošnja po energentima prikazana je u Tablici 3.

Tablica 3. Neposredna potrošnja u sektoru usluga [26]

	Jedinica	2016.	2016.	
			TJ	%
Prirodni plin	10 ⁶ m ³	86,1	3.003	28,9%
Ogrjevno drvo	10 ³ m ³	5,3	48	0,5%
Geotermalna energija	TJ	26,3	26	0,3%
Ostala biomasa	TJ	12,4	12	0,1%
Ukapljeni plin	10 ³ t	4,9	230	2,2%
Ekstralako lož ulje	10 ³ t	18,1	773	7,4%
Lož ulje	10 ³ t	1,8	72	0,7%
Toplinska energija	TJ	1004,6	1.005	9,7%
Električna energija	GWh	1449,2	5.217	50,2%
UKUPNO			10.386	100,0%

Zbrajanjem potrošnje kućanstava i sektora usluga dolazi se do potrošnje plina od 3,039 TWh, biomase od 0,639 TWh te naftnih derivata od 0,289 TWh

4. Potrošnja industrije

Za potrebe industrijske proizvodnje energetske sustav Grada Zagreba godišnje zahtjeva 0,296 TWh zemnog plina te 0,246 TWh naftne i naftnih derivata [26].

5. Potrošnja u transportu

Potrošnja energije u sektoru transporta prikazana je u Tablici 4.

Tablica 4. Potrošnja energije u prometu za Grad Zagreb u 2016. godini [26]

	Jedinica	2016.	2016.	
			TJ	%
Prirodni plin	10 ⁶ m ³	3,5	122	1,0%
Biogoriva	10 ³ t	0,0	0	0,0%
Ukapljeni plin	10 ³ t	9,5	445	3,5%
Motorni benzin	10 ³ t	81,1	3.616	28,2%
Dizelsko gorivo	10 ³ t	194,8	8.320	64,8%
Električna energija	GWh	93,0	335	2,6%
UKUPNO			12.838	100,0%

Kao što je vidljivo iz tablice, najzastupljeniji energent u sektoru transporta su dizelska goriva s potrošnjom od 2,31 TWh godišnje. Nakon njih slijede benzinska goriva s 1 TWh godišnje, dok su od ostalih energenata zastupljeni ukapljeni naftni plin (UNP – 0,124 TWh), prirodni plin (0,0339 TWh) te električna energija (0,093 TWh).

U rubrici opskrbe (eng. supply) uneseni su podaci o pogonima za energetske transformacije u Gradu Zagrebu.

Kao što je već ranije navedeno, gradski energetska sustav opskrbljuju dva kogeneracijska postrojenja (EL-TO i TE-TO). Stoga zagrebački energetska sustav, prema podjeli unutar EnergyPLAN-a (Slika 21.) spada u grupu 3 – CTS sustave bazirane na velikim kogeneracijskim postrojenjima.

Group 1 represents district heating systems with no CHP
 Group 2 represents district heating systems based on small CHP plants
 Group 3 represents district heating systems based on large CHP extraction plants

Slika 21. Podjela CTS-a u EnergyPLAN-u

Kogeneracijsko postrojenje TE-TO, smješteno na zagrebačkom Žitnjaku, sastoji se od osam proizvodnih jedinica (Slika 22.). Od toga pet jedinica proizvodi samo toplinsku energiju, dok preostale tri proizvode istovremeno toplinsku i električnu energiju. U postrojenju se koriste tri tipa goriva: prirodni plin (na slici oznaka g1), ekstra lako loživo ulje (na slici oznaka g2) te loživo ulje (na slici oznaka g3).

snaga proizvodnih jedinica	tip	gorivo	godina izgradnje
blok C 120 MW _e / 200 MW _t	toplifikacijski blok	g1 i g3	1979.
blok D 52 MW _t	pom.parna kotlovnica PK-3	g1 i g3	1985.
blok E 58 MW _t	vrelvodni kotao VK-3	g1	1977.
blok F 58 MW _t	vrelvodni kotao VK-4	g1	1978.
blok G 116 MW _t	vrelvodni kotao VK-5	g1 i g3	1982.
blok H 116 MW _t	vrelvodni kotao VK-6	g1 i g3	1990.
blok K 208 MW _e /140 MW _t (71+71+66MW _e)	kombi kogeneracijski blok s dvije plinske turbine	g1 i g2	2003.
blok L 112 MW _e /110 MW _t (75+37MW _e)	kombi kogeneracijski blok s jednom plinskom i jednom parnom turbinom	g1	2009.

Slika 22. Proizvodne jedinice TE-TO Zagreb [27]

Kogeneracijsko postrojenje EL-TO, smješteno na zagrebačkoj Trešnjevci, sastoji se od šest proizvodnih jedinica (Slika 23.). Od toga tri postrojenja proizvode samo električnu energiju, dok preostala tri proizvode samo toplinsku energiju. U postrojenju se koriste dva tipa goriva: prirodni plin (na slici oznaka g1) te loživo ulje (na slici oznaka g2).

snaga po agregatima	tip	gorivo	godina izgradnje
11 MW _e	toplifikacijski blok	g1, g2	1970.
30 MW _e	toplifikacijski blok	g1, g2	1980.
2 x 23,9 MW _e	kombi kogeneracijski blok s dvije plinske turbine	g1	1998.
64 MW _t	pom.parni kotao	g1, g2	1971.
116 MW _t	pom. vrel. kotao	g1, g2	1991.
116 MW _t	pom. vrel. kotao	g1, g2	2010.

Slika 23. Proizvodne jedinice EL-TO Zagreb [27]

Prilikom unosa u EnergyPLAN sumiran je ukupni toplinski i električni kapacitet obaju postrojenja kao što je prikazano u Tablici 5.

Tablica 5. Ukupni toplinski i električni kapaciteti [27]

Toplinska energija – kotlovi (eng. boilers)	696 MW
Električna energija	88.8 MW
Kogeneracija	440 MW el. en. + 450 MW topl.en.

Zbrojeni podaci uvršteni su u EnergyPLAN pod grupom 3: toplinska energija u rubriku kotlovi (eng. boilers), električna energija u rubriku kondenzacijskog rada (eng. condensing mode operation), dok je kogeneracija uvrštena pod način rada s povratnim tlakom (eng. back pressure mode operation).

Svi potrebni stupnjevi iskorištenja ostavljeni prema zadanim početnim postavkama EnergyPLAN-a.

U rubrici potražnje za gorivima (eng. fuel demand) upisana su goriva koja koriste kogeneracijska postrojenja. Tako su naftni derivati zastupljeni s 41,7 %, dok ostatak, odnosno 58,3 %, zauzima zemni plin.

Što se obnovljivih izvora energije tiče, u energetsom sustavu grada Zagreba zastupljeni su PV kolektori s proizvodnjom od 0,2537 TWh godišnje [26].

Na kraju je bilo potrebno uvrstiti cijene. Cijena po toni CO₂ je 2016. godine prosječno iznosila oko 5 €/t CO₂ [28], što je čak četiri puta manje od aktualne cijene emisija CO₂.

Uvrštene su i cijene goriva u €/GJ.

Nakon uvrštavanja potrebnih ulaznih podataka u EnergyPLAN pristupilo se dvama tipovima simulacije – tehničkoj i ekonomskoj simulaciji tržišta (Slika 24.).



Slika 24. Vrste simulacija u EnergyPLAN-u

Za potrebe referentnog modela provedena je tehnička analiza s balansiranjem potreba za električnom i toplinskom energijom, a rezultati su prikazani na slikama 25. i 26.

Iz dobivenih rezultata izvučeni su referentni podaci s kojima će se uspoređivati modeli s implementiranim pametnim mjerama:

- CEEP – 0 MW
- ukupna godišnja cijena – 6499 mil. €
- uvoz/ izvoz el. energije – 0,34 MW / 0,07 MW
- emisija CO₂ - 2.3 Mt

4.3. Implementacija pametnih mjera

U referentni model energetskeg sustava Grada Zagreba implementirano je pet pametnih mjera:

1. pametno parkiranje,
2. pametna javna rasvjeta,
3. integracija centraliziranog toplinskog i rashladnog sustava s mogućnošću korištenja kanalizacijskog sustava kao izvora otpadne topline, solarnih toplinskih kolektora te dizalica topline,
4. integracije solarnih fotonaponskih elektrana (PV) te
5. integracija električnih vozila,

a kao godina provedbe scenarija uzeta je 2030. godina.

1. Pametno parkiranje

Zagreb parking d.o.o. - koncesionar za upravljanje javnim parkiralištima i garažama na području grada Zagreba, raspolaže s 32 262 parkirna mjesta na području Grada Zagreba. Od tog broja 29 855 je vanjskih parkirnih mjesta, dok su 2 407 mjesta garažna [29].

Zamišljeno je da sustav pametnog parkiranja do 2030. godine obuhvati 50 % svih parkirnih mjesta na području grada što bi iznosilo 16 131 parkirno mjesto.

Prema istraživanju provedenom na floridskom sveučilištu ERAU (Embry-Riddle Aeronautical University), objavljenom u časopisu „Ergonomics and Design“ 2014. godine [30], utvrđeno je kako je instalacijom sustava pametnog parkiranja prosječno vrijeme traženja parkinga skraćeno za 11 sekundi, prilikom čega je prosječna brzina vozača tijekom cirkuliranja po parkiralištu bila 4,83 m/s.

Množenjem tih dvaju podataka dolazimo do uštede od 53,13 m po vozaču. Ukoliko pretpostavimo da se na jednom parkirališnom mjestu izmjene tri vozača dnevno dolazimo do brojke od 48 393 vozača/dan, odnosno do uštede od 2 571,12 km dnevno.

Pomnožimo li taj broj s 365 dolazimo od brojke od 938 458,8 km godišnje.

Za pretpostaviti je da će se na parkirnim mjestima naći jednak broj automobila koji koriste dizelsko gorivo i motorni benzin, te uzimajući u obzir njihovu potrošnju prilikom gradske vožnje dolazimo do godišnjih ušteda od 28 153,75 l odnosno 0,0003 TWh dizelskog goriva te 32 846,06 l odnosno 0,00031 TWh benzinskog goriva.

Ukupna potrošnja goriva u transportu umanjena je za navedeni iznos, no zbog malenog udjela u odnosu na ukupnu potrošnju energenata uštede na razini energetskeg sustava Grada Zagreba nisu vidljive.

Ipak, došlo je do ušteda u emisijama CO₂. Ukoliko uzmemo podatak da prosječan automobil emitira 150 g CO₂/km, dolazimo do smanjena emisija za 140,77 t CO₂ godišnje.

U obzir se mora uzeti i cijena provedbe ovakvog scenarija. Troškovi uvođenja pametnog sustava parkiranja variraju ovisno o vrsti sustava, proizvođaču, tehnološkoj razini sustava itd. Prema istraživanju koje je korišteno prilikom izračuna ušteda cijena ukupna cijena provedbe projekta sastoji se od 180 € fiksnih troškova te 50 € godišnjih troškova popravaka i održavanja po mjestu [50]. Prema tim podacima kapitalni trošak uvođenja tehnologije pametnog parkinga u Grad Zagreb iznosio bi 2,9 milijuna eura, dok bi godišnji trošak održavanja iznosio 806 550 eura.

2. Pametna rasvjeta

Prema podacima iz Akcijskog plana energetskeg održivog razvoja Grada Zagreba [31] na području grada postoji oko 126 500 rasvjetnih tijela električne i plinske javne rasvjete. Udio plinske javne rasvjete u ukupnoj strukturi javne rasvjete je gotovo zanemariv, a čitav sustav plinske javne rasvjete čini 214 javnih rasvjetnih tijela.

U 2015. godini u sektoru javne rasvjete Grada Zagreba potrošeno je 81 294 MWh (0,0813 TWh) električne energije.

U Akcijskom planu energetskeg održivog razvoja Grada Zagreba postoji plan modernizacije javne rasvjete koji uključuje postavljanje pametne javne rasvjete s LED tehnologijom te će se stoga provođenje tog plana uzeti kao implementacija pametne mjere javne rasvjete.

Planirano je da program bude u većini (90 %) financiran od strane programa ELENA (eng. European Local Energy Assistance). ELENA je program Europske Unije za financiranje implementacija mjera bolje energetske učinkovitosti, korištenja obnovljivih izvora energije te poboljšanja transportnih sustava. Potrebna sredstva osigurava EIB (eng. European Investment Bank).

Program modernizacije zahvaća približno 110 000 rasvjetnih tijela. Trošak po rasvjetnom tijelu iznosi 900 €, dok se ukupni očekivani troškovi procjenjuju na 50 milijuna eura.

Nadalje, očekivane uštede iznose 30 000 MWh (0,03 TWh) električne energije godišnje te posljedično smanjenje emisija CO₂ za oko 10 000 t/god.

Tako bi se ukupna potreba Grada Zagreba za električnom energijom smanjila s 3,016 TWh na 2,986 TWh. Novi izlazni rezultati programa EnergyPLAN prikazani su na slikama 27. i 28.

Izlazni rezultati iz EnergyPLAN-a daju sljedeće podatke:

- CEEP – 0 MW
- ukupna godišnja cijena – 6481 mil. €
- uvoz/izvoz el. energije – 0,32 MW / 0,08 MW
- emisija CO₂ - 2,24 Mt

Usporedimo li dane podatke s referentnim modelom možemo uočiti kako je došlo do smanjenja emisija CO₂ za 0,06 Mt odnosno 2,61 %. Isto tako, bolji je balans između uvoza i izvoza električne energije.

Što se tiče ukupnih troškova, implementacija pametne rasvjete donosi godišnju uštedu od 18 milijuna eura, što znači da je period povrata investicije od 50 milijuna eura 2,78 godina. No, ukoliko se 90 % projekta financira nepovratnim sredstvima programa ELENA, period povrata za 10 % investicije (5 mil eura) iznosi samo 0,278 god.

3. Integracija centraliziranog toplinskog i rashladnog sustava s mogućnošću korištenja kanalizacijskog sustava kao izvora otpadne topline, solarnih toplinskih kolektora te dizalica topline

Na području RH još uvijek se potrebe za rashladnom energijom uglavnom zadovoljavaju preko uređaja koji se napajaju električnom energijom.

Stoga je bilo potrebno aproksimirati koliko se dio električne energije koristi za proizvodnju rashladne energije te njega u EnergyPLAN-u izdvojiti u rubriku hlađenje.

Procijenjena je paušalna potreba za rashladnom energijom od 10 kWh po m² izgrađene površine na području Grada Zagreba. Tako se došlo do godišnje potrebe od 1,93 TWh sati potrebne rashladne energije. Ukoliko u obzir uzmemo koeficijent učinka (COP) koji iznosi 3 dolazimo do podatka da se za hlađenje na području Grada Zagreba godišnje koristi 0,643 TWh električne energije.

Tekstom zadatka zadano je da zamišljeni centralizirani rashladni sustava mora zadovoljiti 50 % potreba Grada Zagreba za rashladnom energijom, odnosno 0,965 TWh.

Ukoliko želimo da zagrebački sustav 2030. godine bude približno jednak pariškom sustavu danas, on mora crpiti 50 % energije iz obnovljivih izvora topline kao što su otpadna toplina i dizalice topline. Stoga je model u EnergyPLAN-u modeliran tako da se 50 % potreba za rashladnom energijom centraliziranog rashladnog sustava (0,4825 TWh) crpi pomoću apsorpcijskih dizalica topline. Kod dizalica topline je također korišten COP 3.

U postojeći CTS Grada Zagreba također je bilo potrebno integrirati solarne kolektore i dizalice topline na način da one kombinirano zadovoljavaju 50 % potreba sustava.

Nakon simulacije u EnergyPLAN-u dobiveni su rezultati prikazani na slikama 29. i 30.

Izlazni podaci iz EnergyPLAN-a daju sljedeće rezultate:

- CEEP – 0 MW
- ukupna godišnja cijena – 6455 mil. €
- uvoz/izvoz el. energije – 0,16 MW / 0,18 MW
- emisije CO₂ - 2,24 Mt

Usporedimo li podatke s referentnim modelom vidljivo je da je došlo do smanjenja emisija CO₂ za 0,06 Mt, odnosno 2,61 %. Isto tako, smanjio se uvoz električne energije, dok se izvoz višestruko povećao.

Što se tiče ukupne cijene koštanja, integracija centraliziranog rashladnog sustava i pametnog CTS-a donosi uštedu od 44 milijuna eura godišnje. No, tu valja imati na umu značajne troškove instalacije centraliziranog rashladnog sustava.

4. Integracija solarnih fotonaponskih elektrana (PV)

U referentnoj 2016. godini Grad Zagreb je imao 0,2357 MW instalirane snage PV modula. Zamišljeno je da do 2030. godine PV moduli budu postavljeni na 20 % površine svih krovova u Gradu Zagrebu.

Krovna površina može se pretpostaviti kao izgrađena površina na području Grada Zagreba. Pošto je faktor izgrađenosti na području grada otprilike 0,3, ukupna izgrađena površina može se procijeniti na 193 km². Uzmemo li 20 % od te površine, govorimo o 38,6 km² za postavljanje PV modula.

Gruba procjena kaže da je za instalaciju 1 MW PV modula potrebno 0,01 km² površine te bi se stoga ovom metodom na krovove grada Zagreba moglo postaviti 3 860 MW PV modula.

Novi kapacitet PV modula uvršten u EnergyPLAN daje rezultate prikazane na slikama 31. i 32.

Izlazni rezultati iz EnergyPLAN-a daju sljedeće podatke:

- CEEP – 1,21 MW
- ukupna godišnja cijena – 5686 mil. €
- uvoz/izvoz el. energije – 0,2 MW / 5,65 MW
- emisije CO₂ - 2,22 Mt

Analizom izlaznih podataka može se učiti pojava kritičnog viška proizvedene električne energije zbog velikog povećanja proizvodnje iz obnovljivih izvora energije.

Usporedimo li podatke s referentnim modelom došlo je do smanjenja emisija CO₂ za 0,08 Mt odnosno 3,48 %. Isto tako, bilanca uvoza i izvoza u potpunosti je preokrenuta pa se tako uvoz sveo na minimum dok je izvoz značajno porastao.

Što se tiče ukupnih troškova, implementacija PV modula donosi uštedu od 813 milijuna €. Ukoliko se kao referentna cijena PV modula uzme 0,265 €/W, ukupna cijena postavljanja 3 860 MW PV modula iznosi 1 023 milijuna eura.

Povrat investicije u takvom slučaju iznosio bi 1,258 godina.

5. Integracija električnih vozila

Integracija električnih vozila u sustav transporta Grada Zagreba modelirana je prema broju prijeđenih kilometara.

Za referentnu 2016. godinu je prema neposrednoj potrošnji energenata (Tablica 4.) i izračunatoj efikasnosti u km/KWh za određeni tip goriva dobiven ukupni broj prijeđenih kilometara prikazan u Tablici 6. Valja napomenuti kako je električna energija razdvojena na električnu energiju koju troše tramvaji (65 GWh) te ostatak električne energije koju troše osobna električna vozila (28 GWh).

Tablica 6. Broj prijeđenih kilometara u 2016. godini

Vrsta goriva	TWh	Km/KWh	Milijardi kilometara	% prijeđenih kilometara
Prirodni plin	0,0339	1,6	0,0542	0,97
Biogoriva	0	/	0	0
Ukapljeni plin	0,124	1,6	0,198	3,54
Motorni benzin	1,005	1,51	1,519	27,18
Dizelsko gorivo	2,311	1,58	3,649	65,3
Električna energija (tramvaji)	0,065	/	/	/
Električna energija (automobili)	0,0028	6	0,168	3,01
Ukupno			5,588	100

Podaci o referentnom stanju pokazuju kako osobni električni automobili naprave 3,01 % prijeđenih kilometara u Gradu Zagrebu.

Prema zamišljenom scenariju osobni električni automobili bi 2030. godine trebali napraviti 25 % svih prijeđenih kilometara u gradu Zagrebu, odnosno 1,397 milijardi kilometara. Ekološki neprihvatljiva vozila na dizelska goriva zamijenila bi se električnima te bi broj prijeđenih kilometara po tipu vozila i potrošnja energenata u sektoru transporta izgledali kao u Tablici 7.

Tablica 7. Broj prijeđenih kilometara u 2030. godini

Vrsta goriva	TWh	Km/KWh	Milijardi kilometara	% prijeđenih kilometara
Prirodni plin	0,0339	1,6	0,0542	0,97
Biogoriva	0	/	0	0
Ukapljeni plin	0,124	1,6	0,198	3,54
Motorni benzin	1,005	1,51	1,519	27,18
Dizelsko gorivo	1,533	1,58	2,42	43,31
Električna energija (tramvaji)	0,065	/	/	/
Električna energija (automobili)	0,175	6	1,397	25
Ukupno			5,588	100

Takva potrošnja ubačena u EnergyPLAN daje rezultate prikazane na slikama 33. i 34.

Input zagreb2030_električna_vozila.txt		The EnergyPLAN model 13.0															
Electricity demand (TWh/year):	Flexible demand 0.00	Capacities		Efficiencies		Regulation Strategy:		Technical regulation no. 2		Fuel Price level: Basic		Capacities Storage Efficiencies					
Fixed demand 3.62	Fixed imp/exp -2.37	Group 2:	MW-e	MJ/Js	elec.	Ther	COP	CEEP regulation	00000000	Minimum: Stabilisation share	0.00	Hydro Pump:	0	0	0.80		
Electric heating + HP 0.00	Transportation 0.24	CHP	0	0	0.40	0.50	3.00	Minimum: share of CHP	0.00	Stabilisation share of CHP	0.00	Hydro Turbine:	0	0	0.90		
Electric cooling 0.00	Total 0.89	Heat Pump	0	0				Minimum: CHP gr 3 load	0 MW	Minimum PP	0 MW	Heat Pump maximum share	0.50	Electrol. Gr 2:	0	0	0.73
District heating (TWh/year)	Gr.1	Gr.2	Gr.3	Sum	Group 3:			Maximum import/export	1600 MW	Heat Pump maximum share	0.50	Electrol. trans:	0	0	0.73		
District heating demand	0.00	0.00	1.75	1.75	CHP	89	91	0.40	0.41	Boiler	0	Ey. MicroCHP:	0	0	0.73		
Solar Thermal	0.00	0.00	0.00	0.00	Heat Pump	0	0		3.00	Condensing	89	CAES fuel ratio:	0.000				
Industrial CHP (CSHP)	0.00	0.00	0.00	0.00	Heatstorage: gr.2:	10 GWh	gr.3:	10 GWh		Fixed Boiler: gr.2:	0.0 Per cent	gr.3:	0.0 Per cent				
Demand after solar and CSHP	0.00	0.00	1.75	1.75	Electricity prod. from	CSHP	Waste (TWh/year)			Gr.1:	0.00	0.00					
Photo Voltaic	0 MW	0.00	TWh/year	0.00	Grid	stabilisation				Gr.2:	0.00	0.00					
Photo Voltaic	0 MW	0	TWh/year	0.00	share					Gr.3:	0.00	0.00					
Offshore Wind	0 MW	0	TWh/year	0.00													
River Hydro	0 MW	0	TWh/year	0.00													
Hydro Power	0 MW	0	TWh/year														
Geothermal/Nuclear	0 MW	0	TWh/year														

Output		The EnergyPLAN model 13.0																													
District Heating		Consumption										Electricity			Exchange																
Demand	Production	Bal-	Elec.	Flex.&	Elec-	Hydro	Tur-	RES	Hy-	Geo-	Waste+	Stab-	Balance	Payment																	
Distr. heating MW	Solar MW	Waste+ MW	CSHP MW	DHP MW	CHP MW	HP MW	ELT MW	Boiler MW	EH MW	BA-	demand MW	Transp. MW	HP MW	Electro- MW	Hydro MW	Tur- MW	RES MW	Hy- MW	Geo- MW	Waste+ MW	Stab- MW	Imp	Exp	CEEP	EEP	Imp	Exp				
January	412	0	0	0	71	0	0	341	0	0	382	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	0	100	25	0	0	0	6	0	
February	361	0	0	0	80	0	0	281	0	0	414	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	0	100	52	0	0	0	9	0	
March	283	0	0	0	80	0	0	223	0	0	329	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	0	100	12	0	0	0	2	0	
April	181	0	0	0	89	0	0	113	0	-1	316	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	0	100	16	0	0	0	3	0	
May	60	0	0	0	31	0	0	30	0	-1	304	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	100	0	7	0	7	0	1	
June	60	0	0	0	10	0	0	50	0	0	321	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	100	0	33	0	33	0	4	
July	60	0	0	0	36	0	0	22	0	1	363	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	100	2	7	0	7	0	0	
August	60	0	0	0	46	0	0	14	0	0	358	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	0	100	5	4	0	4	1	1	
September	60	0	0	0	66	0	0	3	0	-9	318	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	6	100	16	0	0	0	3	0	
October	179	0	0	0	86	0	0	89	0	4	314	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84	0	100	46	0	0	0	6	0	
November	293	0	0	0	91	0	0	202	0	0	332	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	0	100	166	0	0	0	25	0	
December	392	0	0	0	91	0	0	302	0	0	371	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	0	100	196	0	0	0	35	0	
Average	200	0	0	0	61	0	0	139	0	0	343	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	100	45	4	0	4		Average price (EUR/MWh)	
Maximum	606	0	0	0	91	0	0	573	0	85	554	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	21	100	315	125	0	125		247	166
Minimum	60	0	0	0	0	0	0	0	0	-31	196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		166
TWh/year	1.75	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00	0.00	1.22	0.00	0.00	3.02	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	0.39	0.64	0.00	0.04	0.04	97	6	
FUEL BALANCE (TWh/year)		CAES BioCon- Electro-										Industry			CO2 emission (Mt)																
DHP	CHP3	CHP2	Boiler2	Boiler3	PP	Geo/Nu	Hydro	Waste	Elec. Effic.	version	Fuel	PV	Offsh.	Hydro	Solar.Th	Transp.	househ.	Various	Total	Imp/Exp	Corrected	Net	Total	Net							
Coal	-	-	0.00	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
Oil	-	-	0.55	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	3.62	0.00	3.62	0.96	0.96						
N.Gas	-	-	0.77	-	-	1.35	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.16	3.04	0.30	5.62	0.00	5.62						
Biomass	-	-	0.00	-	-	0.00	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.64	-	0.64	0.00	0.64						
Renewable	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
H2 etc.	-	-	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
Biofuel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
Nuclear/CCS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
Total	-	-	1.32	-	-	1.35	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.69	3.97	0.54	9.88	0.79	10.67	2.11	2.14				

Slika 33. Rezultati implementacije električnih vozila 1/2

Output specifications zagreb2030_električna_vozila.txt													The EnergyPLAN model 13.0																	
District Heating Production													RES specification																	
Gr.1				Gr.2								Gr.3								RES specification										
District heating	Solar	C-SHP	DHP	District heating	Solar	C-SHP	CHP	HP	ELT	Boiler	EH	Storage	Balance	District heating	Solar	C-SHP	CHP	HP	ELT	Boiler	EH	Storage	Balance	RES1 Photo	RES2 Photo	RES3 Offshoi	RES4-7 ind	Total		
MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	
January	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	412	0	0	71	0	0	341	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
February	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	361	0	0	80	0	0	281	0	16	0	0	0	0	0	0	0	
March	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	283	0	0	60	0	0	223	0	48	0	0	0	0	0	0	0	
April	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181	0	0	69	0	0	113	0	1278	-1	0	0	0	0	0	0	
May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	31	0	0	30	0	1100	-1	0	0	0	0	0	0	
June	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	10	0	0	50	0	1143	0	0	0	0	0	0	0	
July	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	36	0	0	22	0	1113	1	0	0	0	0	0	0	
August	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	46	0	0	14	0	599	0	0	0	0	0	0	0	
September	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	66	0	0	3	0	3340	-9	0	0	0	0	0	0	
October	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	179	0	0	36	0	0	89	0	3952	-4	0	0	0	0	0	0	
November	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	293	0	0	91	0	0	202	0	3585	0	0	0	0	0	0	0	
December	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	392	0	0	91	0	0	302	0	3563	0	0	0	0	0	0	0	
Average	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	61	0	0	139	0	1649	0	0	0	0	0	0	0	
Maximum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	606	0	0	91	0	0	573	0	6467	85	0	0	0	0	0	0	
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	-31	0	0	0	0	0	0	
Total for the whole year																														
TWh/year	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.75	0.00	0.00	0.54	0.00	0.00	1.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Own use of heat from industrial CHP:	0.00 TWh/year																													
ANNUAL COSTS (Million EUR)																														
Total Fuel ex Ngas exchange =	275																													
Uranium =	0																													
Coal =	0																													
FuelOil =	36																													
Gasoli/Diesel=	112																													
Petrol/IP =	65																													
Gas handling =	40																													
Biomass =	21																													
Food income =	0																													
Waste =	0																													
Total Ngas Exchange costs =	235																													
Marginal operation costs =	2																													
Total Electricity exchange =	-440																													
Import =	97																													
Export =	-6																													
Bottleneck =	0																													
Fixed implex=	-530																													
Total CO2 emission costs =	11																													
Total variable costs =	83																													
Fixed operation costs =	6045																													
Annual Investment costs =	344																													
TOTAL ANNUAL COSTS =	6472																													
RES Share: 6.5 Percent of Primary Energy 0.0 Percent of Electricity 0.0 TWh electricity from RES																														
21-February-2019 [13:47]																														

Slika 34. Rezultati implementacije električnih vozila 2/2

Izlazni rezultati iz EnergyPLAN-a daju sljedeće podatke:

- CEEP – 0 MW
- ukupna godišnja cijena – 6472 mil. €
- uvoz/izvoz el. energije – 0,39 MW / 0,04 MW
- emisije CO₂ - 2,11 Mt

Usporedbom podataka s referentnim modelom može se uočiti kako je ostvareno smanjenje emisije CO₂ od 0,19 Mt odnosno 8,26 % godišnje. Što se tiče odnosa uvoz/izvoz potrebno je uvoziti nešto više električne energije, no razlika je u samo 0,05 MW.

Na području ukupnih troškova implementacijom električnih vozila došlo je do uštede od 26 milijuna eura. Ipak, na rashodovnoj se strani mora uzeti u obzir kapital potreban za izgradnju mreže punionica diljem grada.

Premda svaka od implementiranih mjera ostvaruje smanjenje štetnih emisija i financijske ušteda, idealan bi scenarij obuhvaćao istovremenu provedbu svih pet mjera.

Energetski sustav koji implementira sve gore navedene mjere, nakon ubacivanja u EnergyPLAN, daje rezultate prikazane na slikama 35. i 36.

Input zagreb2030_ukupno.txt										The EnergyPLAN model 13.0																																		
Electricity demand (TWh/year): Flexible demand 0.00					Capacities					Efficiencies					Regulation Strategy: Technical regulation no. 2					Fuel Price level: Basic																								
Fixed demand 2.02 Fixed imp/exp. -2.37					Group 2: MW-e MJ/s elec. Ther COP					CEEP regulation 00000000					Minimum Stabilisation share 0.00					Capacities Storage Efficiencies																								
Electric heating + HP 0.00 Transportation 0.24					Heat Pump 0 0 0.40 0.50					Stabilisation share of CHP 0.00					Minimum CHP gr 3 load 0 MW					Hydro Pump: 0 0 0.80																								
Electric cooling 0.32 Total 0.21					Boiler 0 0 0.90					Minimum PP 0 MW					Heat Pump maximum share 0.50					Hydro Turbine: 0 0 0.90																								
District heating (TWh/year) Gr.1 Gr.2 Gr.3 Sum					Group 3: CHP 89 91 0.40 0.41					Maximum import/export 1600 MW					Electrol. Gr.2: 0 0 0.73 0.05					Electrol. Gr.3: 0 0 0.73 0.05																								
District heating demand 0.00 0.00 1.75 1.75					Heat Pump 0 0 3.00					Distr. Name: Hour_nordpool td					Ely. MicroCHP: 0 0 0.73					CAES fuel ratio: 0.000																								
Solar Thermal 0.00 0.00 0.39 0.39					Boiler 0 0 0.90					Addition factor 0.00 EUR/MWh					(TWh/year) Coal Oil Ngas Biomass					Transport 0.00 2.53 0.03 0.00																								
Industrial CHP (CSHP) 0.00 0.00 0.00 0.00					Condensing 89 696 0.45					Multiplication factor 2.00					Household 0.00 0.29 3.04 0.64					Industry 0.00 0.25 0.30 0.00																								
Demand after solar and CSHP 0.00 0.00 1.36 1.36					Heatstorage: gr.2: 10 GWh gr.3: 10 GWh					Dependency factor 0.00 EUR/MWh pr. MW					Various 0.00 0.00 0.00 0.00					CAES 0.00 0.00 0.00 0.00																								
Photo Voltaic 3860 MW 5.94 TWh/year 0.00 Grid					Fixed Boiler: gr.2: 0.0 Per cent gr.3: 0.0 Per cent					Average Market Price 227 EUR/MWh					Gas Storage 0 GWh					Syngas capacity 0 MW					Biogas max to grid 0 MW																			
Photo Voltaic 0 MW 0 TWh/year 0.00 stabili-					Electricity prod. from CSHP Waste (TWh/year)					Gr.1: 0.00 0.00					Gr.2: 0.00 0.00					Gr.3: 0.00 0.00																								
Offshore Wind 0 MW 0 TWh/year 0.00 sation					Gr.1: 0.00 0.00																																							
River Hydro 0 MW 0 TWh/year 0.00 share					Gr.2: 0.00 0.00																																							
Hydro Power 0 MW 0 TWh/year					Gr.3: 0.00 0.00																																							
Geothermal/Nuclear 0 MW 0 TWh/year																																												
Output WARNING!!: (1) Critical Excess;																																												
District Heating										Electricity										Exchange																								
Demand										Production										Balance		Payment																						
Distr. heating	Solar	CSHP	DHP	CHP	HP	ELT	Boiler	EH	MW	Ba-	Elec-	Flex &	Elec-	Hydro	Tur-	RES	Hy-	Geo-	Waste+	CSHP	CHP	PP	Stab-	Imp	Exp	CEEP	EEP	Imp	Exp															
MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	lance	demand	Transp	HP	trolyser	Pump	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	Load	MW	MW	MW	MW	MW	MW															
January	463	30	0	0	17	0	0	416	0	0	297	27	0	0	0	0	252	0	0	0	17	0	100	0	250	0	250	0	64															
February	416	52	0	0	25	0	0	339	0	0	322	27	0	0	0	0	393	0	0	0	24	0	100	4	372	3	369	1	58															
March	353	50	0	0	12	0	0	291	0	0	255	27	0	0	0	0	602	0	0	0	12	0	100	0	603	62	541	0	123															
April	272	61	0	0	16	0	0	195	0	0	246	27	0	0	0	0	843	0	0	0	16	0	100	0	827	174	653	0	172															
May	174	50	0	0	3	0	0	120	0	0	236	27	0	0	0	0	1051	0	0	0	3	0	100	0	1075	307	769	0	259															
June	183	54	0	0	0	0	0	128	0	0	249	27	0	0	0	0	1151	0	0	0	0	0	100	0	1221	391	830	0	244															
July	188	57	0	0	3	0	0	128	0	0	282	27	0	0	0	0	1170	0	0	0	2	0	100	0	1196	398	799	0	180															
August	187	54	0	0	6	0	0	127	0	0	278	27	0	0	0	0	992	0	0	0	5	0	100	0	1006	286	720	0	174															
September	177	41	0	0	19	0	0	116	0	0	247	27	0	0	0	0	719	0	0	0	19	0	100	0	700	110	589	0	129															
October	274	35	0	0	38	0	0	201	0	0	244	27	0	0	0	0	463	0	0	0	37	0	100	3	428	16	412	1	80															
November	366	30	0	0	59	0	0	277	0	0	258	27	0	0	0	0	267	0	0	0	58	0	100	67	196	0	196	11	33															
December	448	21	0	0	62	0	0	365	0	0	288	27	0	0	0	0	203	0	0	0	60	0	100	81	131	0	131	14	24															
Average	291	45	0	0	22	0	0	225	0	0	267	27	0	0	0	0	676	0	0	0	21	0	100	13	668	146	522	Average price	28	1540														
Maximum	657	610	0	0	91	0	0	650	0	0	430	53	0	0	0	0	3660	0	0	0	89	0	100	219	3861	2261	1600	(EUR/MWh)																
Minimum	118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	153	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	236	262														
TWh/year	2.56	0.39	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	1.98	0.00	0.00	2.34	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	5.94	0.00	0.00	0.19	0.00	0.12	5.67	1.28	4.59																			
FUEL BALANCE (TWh/year):										Industry										CO2 emission (Mt):																								
DHP	CHP2	CHP3	Boiler2	Boiler3	PP	Geo/Nu.	Hydro	Waste	CAES	BioCon.	Electro-	PV	PV	Offsh.	Hydro	Solar.Th.	Transp.	househ.	Various	Total	Imp/Exp	Corrected	Net	Total	Net																			
Coal	-	-	0.00	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																			
Oil	-	-	0.19	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.26	0.00	0.00	3.26	0.87	0.87																			
N.Gas	-	-	0.27	-	-	2.20	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.96	0.00	0.00	5.96	1.22	1.24																			
Biomass	-	-	0.00	-	-	0.00	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	0.64	0.00	0.64	0.00	0.00	0.00																			
Renewable	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.94	-	-	-	-	-	-	-	6.33	0.00	0.00	6.33	0.00	0.00																			
H2 etc.	-	-	0.00	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																			
Biofuel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																			
Nuclear/CCS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																			
Total	-	-	0.46	-	-	2.20	0.00	-	-	-	0.00	-	5.94	-	-	-	0.39	2.69	3.97	0.54	16.19	-12.78	3.41	2.09	2.11																			

Slika 35. Rezultati skupne implementacije pametnih mjera 1/2

Output specifications zagreb2030_ukupno.txt												The EnergyPLAN model 13.0																																																																			
District Heating Production												RES specification																																																																			
Gr. 1				Gr. 2								Gr. 3								RES specification																																																											
District heating	Solar	CSHP	DHP	District heating	Solar	CSHP	CHP	HP	ELT	Boiler	EH	Storage	Balance	District heating	Solar	CSHP	CHP	HP	ELT	Boiler	EH	Storage	Balance	RES1 Photo	RES2 Photo	RES3 Offshore	RES4-7 ind	Total RES																																																			
MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW																																																		
January	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	463	30	0	17	0	0	416	0	0	0	252	0	0	0	252																																																			
February	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	416	52	0	25	0	0	339	0	0	0	393	0	0	0	393																																																			
March	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	353	50	0	12	0	0	291	0	0	0	602	0	0	0	602																																																			
April	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	272	61	0	16	0	0	195	0	0	0	843	0	0	0	843																																																			
May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	174	50	0	3	0	0	120	0	0	0	1051	0	0	0	1051																																																			
June	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	183	54	0	0	0	0	128	0	0	0	1151	0	0	0	1151																																																			
July	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	188	57	0	3	0	0	128	0	0	0	1170	0	0	0	1170																																																			
August	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	187	54	0	6	0	0	127	0	0	0	992	0	0	0	992																																																			
September	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	177	41	0	19	0	0	116	0	0	0	719	0	0	0	719																																																			
October	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	274	35	0	38	0	0	201	0	0	0	463	0	0	0	463																																																			
November	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	366	30	0	59	0	0	277	0	0	0	267	0	0	0	267																																																			
December	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	448	21	0	62	0	0	365	0	0	0	203	0	0	0	203																																																			
Average	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	291	45	0	22	0	0	225	0	0	0	676	0	0	0	676																																																			
Maximum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	657	610	0	91	0	0	650	0	0	0	3860	0	0	0	3860																																																			
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																			
Total for the whole year																																																																															
TWh/year				0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00								2.56 0.39 0.00 0.19 0.00 0.00 1.96 0.00 0.00								5.94 0.00 0.00 0.00 5.94																																																											
Own use of heat from industrial CHP: 0.00 TWh/year																																																																															
ANNUAL COSTS (Million EUR)																NATURAL GAS EXCHANGE																																																															
Total Fuel ex Ngas exchange = 260				DHP & Boilers				CHP2				PP CAES				Individual				Trans port				Indu. Var.				Demand				Bio-gas				Syn-gas				CO2Hy gas				SynHy gas				SynHy gas				Storage				Sum				Im-port				Ex- port															
Uranium = 0				MW				MW				MW				MW				MW				MW				MW				MW				MW				MW				MW				MW				MW				MW																							
Coal = 0				January				February				March				April				May				June				July				August				September				October				November				December				Average				Maximum				Minimum				Total for the whole year															
Fuel/Oil = 21				462				377				323				217				134				143				142				129				223				308				405				250				722				0				2.20																			
Gas/oil/Diesel = 112				24				35				18				23				4				4				4				4				4				4				4				4				4				4				4				4															
Petrol/JP = 65				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0											
Gas handling = 40				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0							
Biomass = 21				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0							
Food income = 0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0			
Waste = 0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0			
Total Ngas Exchange costs = 250				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0							
Marginal operation costs = 1				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0							
Total Electricity exchange = -1679				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0							
Import = 28				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0							
Export = -1540				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0							
Bottleneck = 364				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0							
Fixed implex = -530				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0							
Total CO2 emission costs = 10				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0											
Total variable costs = -1158				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0											
Fixed operation costs = 6088				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0											
Annual Investment costs = 700				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0															
TOTAL ANNUAL COSTS = 5630				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0				0															
RES Share: 43.1 Percent of Primary Energy 262.7 Percent of Electricity 5.9 TWh electricity from RES 21-February-2019 [14:42]																																																																															

Slika 36. Rezultati skupne implementacije pametnih mjera 2/2

Izlazni rezultati iz EnergyPLAN-a daju sljedeće podatke:

- CEEP – 1,28 MW
- ukupna godišnja cijena – 5630 mil. €
- uvoz/izvoz el. energije – 0,12 MW / 5,87 MW
- emisije CO₂ - 2,09 Mt

Usporedbom izlaznih podataka s onima iz referentnog modela može se zaključiti da se, kao što je bilo i za očekivati, skupnom implementacijom svih pet pametnih mjera postiču najbolji rezultati.

Veliki kapacitet PV modula pridonosi pojavi CEEP-a u iznosu nešto većem nego kod zasebne implementacije PV modula. Omjer uvoza i izvoza električne energije također je izrazito povoljan.

Na području emisija CO₂ ostvareno je smanjenje od 0,21 Mt, odnosno 9,13 %, što je također bolje nego kod bilo koje od pojedinačnih implementacija.

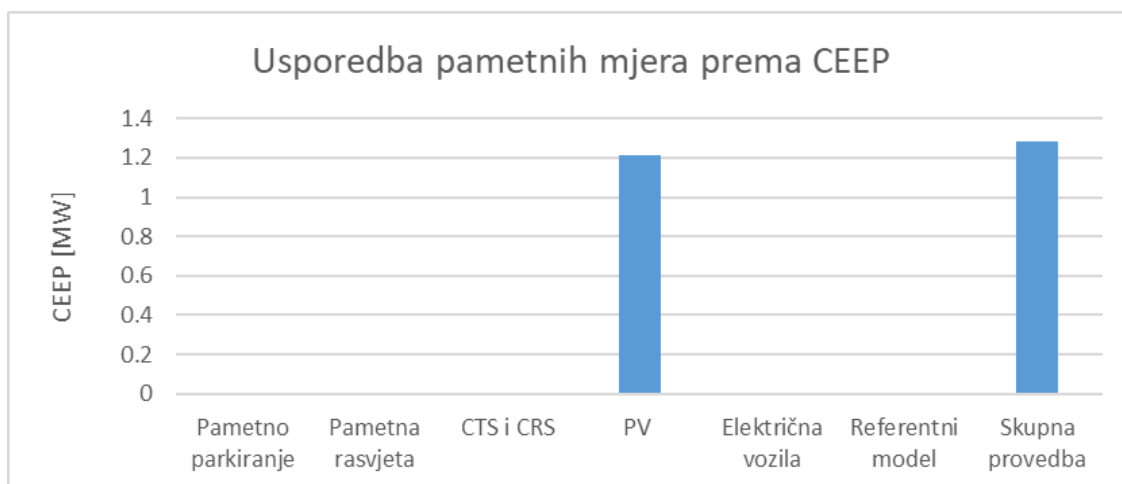
S financijske strane ostvarena je ušteda od 869 milijuna eura, no tu valja uzeti u obzir i troškove provođenja zadanih mjera.

4.4 Usporedba implementiranih pametnih mjera

Implementirane pametne mjere su, nakon usporedbe s referentnim modelom, uspoređene međusobno i s rezultatima skupne provedbe svih mjera. Kao i dosad, korišteno je pet parametara iz EnergyPLAN-a:

1. CEEP
 2. Ukupna godišnja cijena
 3. Uvoz električne energije
 4. Izvoz električne energije
 5. Emisije CO₂
1. Kritični višak proizvodnje električne energije (CEEP)

Rezultati usporedbe pametnih mjera po količini CEEP-a dani su u Dijagramu 1.

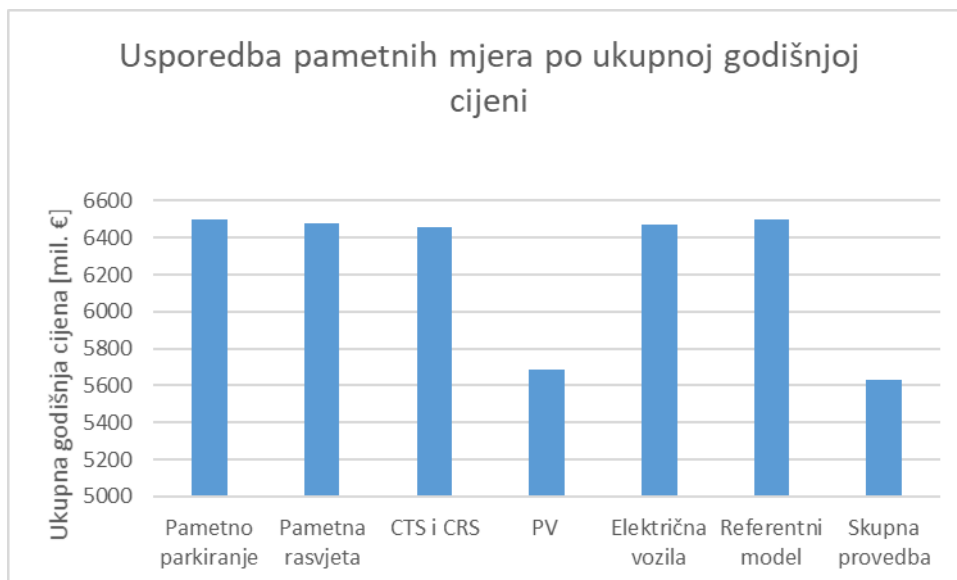


Dijagram 1. Usporedba pametnih mjera prema CEEP

Iz dijagrama je jasno vidljivo kako do pojave CEEP-a dolazi samo kod instalacije PV modula te skupne provedbe svih mjera što je i logično jer se CEEP pojavljuje kod velikog udjela obnovljivih izvora energije u energetsom sustavu.

2. Ukupna godišnja cijena

Rezultati usporedbe pametnih mjera po ukupnoj godišnjoj cijeni dani su u Dijagramu 2.



Dijagram 2. Usporedba pametnih mjera prema ukupnoj godišnjoj cijeni

Iz dijagrama je jasno vidljivo kako bi se najveće uštede kod provedbe samo jedne od mjera ostvarile postavljanjem PV modula na 20 % krovova u Gradu Zagrebu.

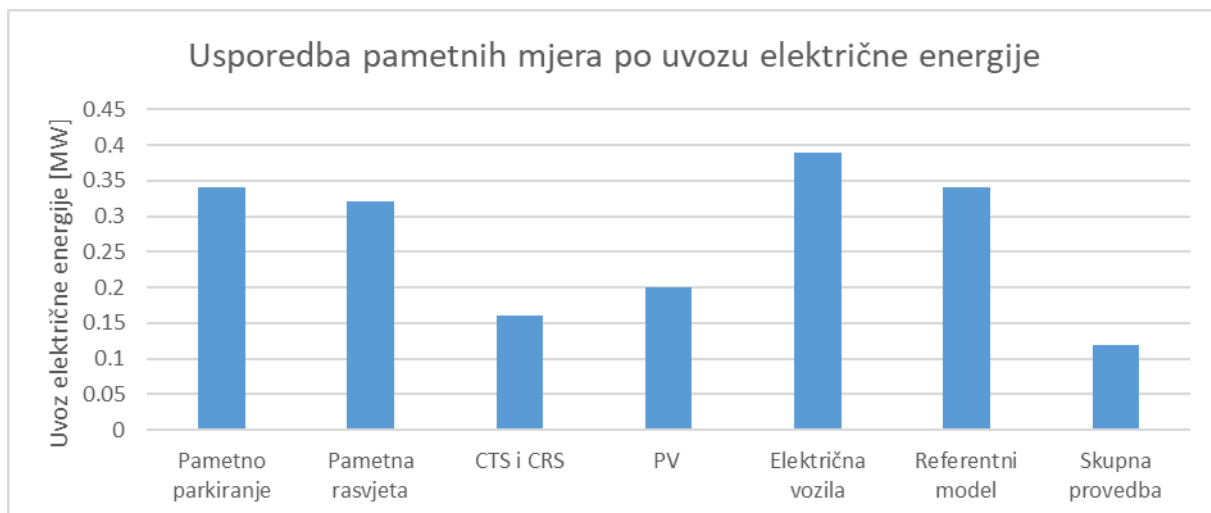
Daleko najveće uštede postižu se skupnom provedbom svih mjera.

Isto tako, valja naglasiti kako su uštede goriva implementacijom pametnog parkiranja premale da bi bile vidljive u EnergyPLAN simulaciji.

Rezultate ove usporedbe treba uzeti s dozom opreza jer u računicu nisu uključeni troškovi instalacije i održavanja pametnih sustava. U tekstu su dani neki primjeri troškova za sustav pametnog parkiranja, pametne rasvjete i postavljanja PV modula te je izračunat okvirni povrat investicije, no neke je troškove, poput troškova izgradnje CRS-a nemoguće realno procijeniti.

3. Uvoz električne energije

Rezultati usporedbe pametnih mjera po uvozu električne energije dani su u Dijagramu 3.

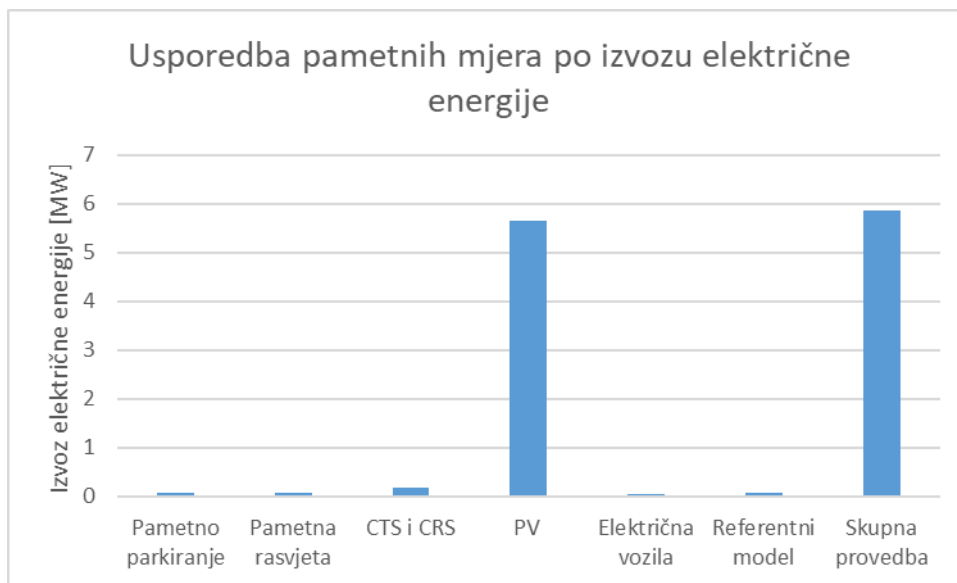


Dijagram 3. Usporedba pametnih mjera po uvozu električne energije

Iz dijagrama je vidljivo da je jedino u slučaju integracije električnih automobila došlo do povećanja potrebnog uvoza električne energije, no i to je povećanje relativno malo u odnosu na smanjenja koja su postignuta implementacijom drugih mjera.

4. Izvoz električne energije

Rezultati usporedbe pametnih mjera po izvozu električne energije dani su u Dijagramu 4.

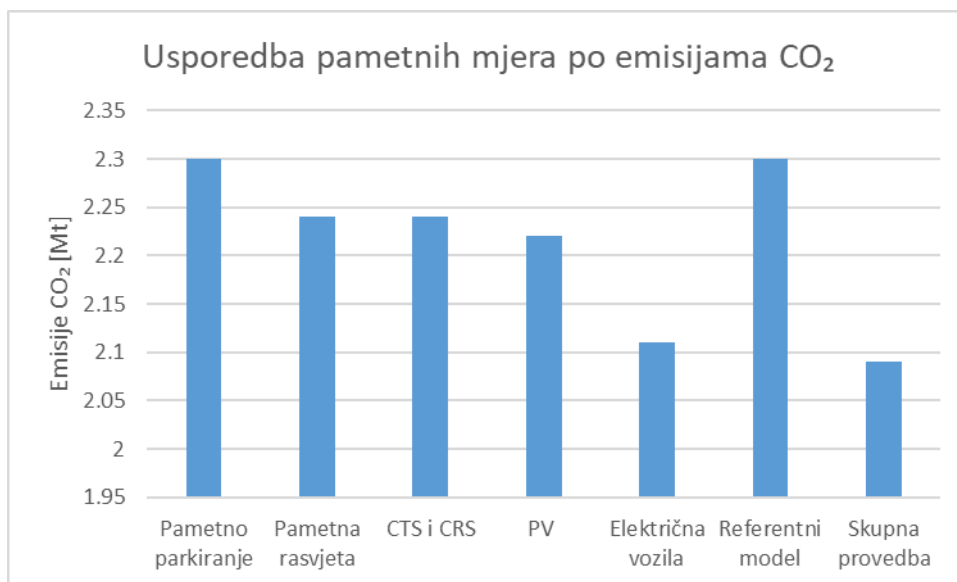


Dijagram 4. Usporedba pametnih mjera po izvozu električne energije

Iz dijagrama je vidljivo kako je značajno povećanje izvoza električne energije postignuto jedino implementacijom PV modula te skupnom provedbom svih mjera.

5. Emisije CO₂

Rezultati usporedbe pametnih mjera po uvozu emisijama CO₂ dani su u Dijagramu 5.



Dijagram 5. Usporedba pametnih mjera po emisijama CO₂

Iz dijagrama je vidljivo kako je implementacijom svake od pametnih mjera postignuto smanjenje štetnih emisija CO₂. Smanjenje je postignuto i uvođenjem sustava pametnog parkiranja, no ušteda od 140 t CO₂ nije vidljiva u EnergyPLAN-u.

5. ZAKLJUČAK

Koncept održivog razvoja prepoznat je kao ideal kojem bi čovječanstvo trebalo težiti, a jedan od glavnih nositelja tog koncepta su pametni gradovi.

Povećana energetska učinkovitost te smanjenje štetnih emisija od presudne su važnosti za energetske održivost pametnog grada. Upravo k tom cilju teže pametne mjere iz područja energetike koje se implementiraju u zajednice diljem svijeta.

Iako Hrvatska, pa tako i Zagreb, još uvijek zaostaju za europskim primjerima, vidljiv je početak implementacije tehnološki naprednih pametnih mjera i u hrvatske gradove.

Provedenom analizom u EnergyPLAN-u pokazano je kako svaka od implementiranih mjera na energetske sustav Grada Zagreba povećava energetske učinkovitost te smanjuje štetne emisije. No, isto tako, valja uzeti u obzir i cijenu provedbe određenih mjera koja često puta koči njihovu primjenu u realnom svijetu.

Od pojedinačnih mjera najveće smanjenje emisija CO₂ ostvarilo se implementacijom električnih vozila. Ukupne godišnje emisije smanjenje su za 0,19 Mt, odnosno 8,26 %. S financijske strane najveće godišnje uštede ostvarene su implementacijom PV modula. Ukupna godišnja cijena energetskog sustava smanjenja je za 813 milijuna eura, s povratom investicije od 1,258 godina.

Stoga su upravo implementacija PV modula i integracija većeg broja električnih vozila pokazane kao najisplativije pojedinačne pametne mjera. Idealan scenarij bila bi skupna provedba svih pet razmatranih pametnih mjera koja bi donijela smanjenje emisija CO₂ u iznosu od 0,21 Mt (9,13 %) te godišnje uštede od 869 milijuna eura. Ipak, cijena provedbe svih mjera također bi bila poprilična.

Premda provedba pametnih mjera sa sobom povlači investicijske troškove, analizom je pokazano kako njihova implementacija donosi značajne uštede s ekonomskog i energetskog aspekta te će primjena pametnih mjera u budućnosti zasigurno biti sastavni dio energetske strategije Grada Zagreba i Republike Hrvatske.

LITERATURA

- [1] Online Enciklopedija Leksikografskog zavoda Miroslava Krležę, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=22952>, 10.2.2019.
- [2] United Nations – Department of Economic and Social Affairs, <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>, 10.2.2019.
- [3] Wikipedia – Sustainable development, https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable_development, 11.2.2019.
- [4] Al Wear H., Deakin M., „From Intelligent to Smart Cities“, Routledge, 2012.
- [5] KPMG International – Harnessing the Smart City opportunity, <https://home.kpmg/au/en/home/insights/2017/11/harnessing-the-smart-city-opportunity.html>, 11.2.2019.
- [6] Reuters – smart parking, <https://www.financialexpress.com/industry/startup-parkwheels-turns-chaotic-parking-into-smart-parking/728460/>, 11.2.2019.
- [7] Libelium.com – smart parking, <http://www.libelium.com/>, 11.2.2019.
- [8] Escolar S., Carretero J., Marinescu M., Chessa S., „Estimating Energy Savings in Smart Street Lighting by Using an Adaptive Control System“, International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014.
- [9] Zakon o tržištu toplinske energije, Narodne novine 80/13
- [10] UNEP, „District Energy in Cities: Unlocking the Potential of Energy Efficiency and Renewable Energy“, 2015.
- [11] EPA – Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>, 11.2.2019.
- [12] Loumakis G., „Potential for Plastics and Rubber in Low Cost Solar Thermal Collectors“
- [13] Tree Hugger – Renewable Energy, <https://www.treehugger.com/renewable-energy/africas-largest-solar-farm-325000-pv-modules-now-fully-operational.html>, 12.2.2019.
- [14] European Commission – Funding Programmes, <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>, 12.2.2019.
- [15] EIP – SCC – smart cities, <https://eu-smartcities.eu/>, 12.2.2019.

- [16] Juniper Research, „Smart cities – What's in it for citizens?“, 2016.
- [17] Ajuntament de Barcelona – City Protocol, <http://81.47.175.201/project-protocol/index.php/xarxa-ortogonal-d-autobus-a-barcelona>, 13.2.2019.
- [18] Amsterdam City Data – Gemeente Amsterdam, <https://data.amsterdam.nl/>, 13.2.2019.
- [19] Amsterdam Smart City.com, 13.2.2019.
- [20] Riahi L., UNEP, „District Energy in Cities: Paris Case Study“
- [21] Vincent Callebaut Architectures: „Paris 2050“
- [22] Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, „Indikatori mobilnosti u konceptu Smart City“, 2017.
- [23] Koprivnica.hr – pametan grad, <https://koprivnica.hr/category/pametan-grad/>, 13.2.2019.
- [24] Tportal.hr – „Zadar dobio prve pametne govornice u Hrvatskoj“, 2017.
- [25] REGEA – Regionalna energetska agencija sjeverozapadne Hrvatske, <http://regea.org/smart-city/>, 13.2.2019.
- [26] Energetski institut Hrvoje Požar, „Energetska bilanca Grada Zagreba za 2016. godinu s procjenama potrošnje za 2017. i 2018.“, 2017.
- [27] HEP Proizvodnja – Termoelektrane, <http://proizvodnja.hep.hr/proizvodnja/osnovni/termoelektrane/teto.aspx>, 15.2.2019.
- [28] Business Insider – Commodities, <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte>, 15.2.2019.
- [29] Brkić D., „Analiza postojećeg stanja i prijedlog optimizacije sustava parkiranja u Gradu Zagrebu“, 2015.
- [30] Surpis G., Liu D., Vicenzi D., „How Much Can a Smart Parking System Save You?“, Ergonomics in Design The Quarterly of Human Factors Application, 2014.
- [31] Mehadžić M., Šegon V., Maras H., „Revizija Akcijskog plana energetske održivog razvitka Grada Zagreba“, 2017.