

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



***Istraživanje puteva energetske tranzicije -
međuvodnost "power-to-X" tehnologija,
tehnologija odgovora potrošnje i povezivanja tržišta
energijom – INTERENERGY***

***D1.1 – Pregled dostupnih tehnologija za odgovor
potrošnje na mikro razini***

Zagreb, 2021. godina

Projektni tim:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Prof. dr. sc. Ingo Stadler

Prof. dr. sc. Henrik Lund

Izv. prof. dr. sc. Iva Ridjan Skov

Prof. dr. sc. Fei Wang

Antun Pfeifer, mag. ing. mech.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Podjela odgovora potrošnje prema angažmanu potrošača	2
1.2. Podjela odgovora potrošnje prema vremenskom koraku	3
1.3. Tehnologije odgovora potrošnje na mikro-razini.....	4
2. Tržišta električne energije i tehnologije odgovora potrošnje – osvrt na paket Čista energija i pretpostavke suradnje OPS – ODS u europskoj legislativi	6
2.1. Prava potrošača	6
2.2. Ugovor s agregatorom.....	7
2.3. Aktivni krajnji korisnici	7
2.4. Odgovor potrošnje.....	8
2.5. Zadaci operatora distribucijskog sustava u korištenju fleksibilnosti	8
2.6. Odgovor potrošnje na tržištima električne energije i uravnoteženja u Hrvatskoj.....	9
3. Implicitni i eksplicitni odgovor potrošnje	10
3.1. Implicitni odgovor potrošnje.....	13
3.2. Eksplicitni odgovor potrošnje	14
3.3. Industrijski procesi	14
3.4. Termostatska električna opterećenja	17
3.5. Konverzija električne energije u toplinsku ili rashladnu energiju uz primjenu dizalica topline i otporničkih grijača	19
3.6. Rasvjeta.....	20
3.7. Industrijski procesi obrade otpadnih voda	20
3.8. Pumpna postrojenja u poljoprivredi	21
3.9. Podatkovni centri	22
3.10. Sustavi skladištenja energije	22
3.11. Vozilo na mreži	24
3.12. Javne punionice električnih vozila	26
3.13. Pametna kućanstva	27
3.14. Sustavi grijanja, hlađenja i ventilacije u stambenim objektima.....	31
4. Pametna mreža i sudjelovanje zgrade u pametnoj mreži	32
5. Osvrt na mrežne kodove za tehnologije odgovora potrošnje u EU	35
6. Nova tehnološka rješenja za krajnje korisnike.....	38
6.1. Osnove blockchain tehnologije	38
6.2. Blockchain u energetske sektoru	38
6.3. Blockchain u elektrificiranom prometu	39

6.4. Korištenje strojnog učenja	39
7. Procjene troškova komponenti za omogućavanje tehnologija odgovora potrošnje ..	41
LITERATURA	47

POPIS SLIKA

Slika 1. „Duck curve“ problem [2].....	1
Slika 2 Prikaz pomicanja potrošnje radi uravnoteženja sustava [5]	2
Slika 3. Vrste odgovora potrošnje [2]	4
Slika 4. Prikaz potencijala smanjenja (lijevo) i povećanja (desno) opterećenja u Europi,	10
Slika 5. Usporedba scenarija bez potrošača s vlastitom proizvodnjom prosumera (lijevo) te scenarija s potrošačima s vlastitom proizvodnjom (desno), ([15])	12
Slika 6. Dimenzije i vrste odgovora potrošnje [16]	13
Slika 7. Očekivano kretanje potrošnje energije u sustavima hlađenja [23]	18
Slika 8. Optimizirana potražnja za električnom energijom (lijevo) za zagrijavanje jednog domaćinstva sa satnim sustavom aktivnog odgovora potrošnje (ADR) (0-100%) s ciljem optimizacije u vidu najnižih troškova uz istodobno zadovoljavanje ograničenja toplinske udobnosti (desno) tijekom dva zimska dana [25]	18
Slika 9. Tehnologije pretvorbe električne u toplinsku energiju na centraliziranim (lijevo) i decentraliziranim (desno) sustavima (Bloess et al.[28])	19
Slika 10. Percepcija promjene svjetlosti, Lee et al. [30]	20
Slika 11. Mogućnosti prilagodbe opterećenja u postrojenjima za obradu otpadnih voda [31]	21
Slika 12. Potrošnja energije u podatkovnom centru sa i bez korištenja mjera odgovora potrošnje [33]	22
Slika 13. Sustavi pohrane energije, Stadler et al. [34]	23
Slika 14. Primjena V2G i tehnologije pametnog punjenja u smislu odgovora potrošnje, prilagođeno iz [35] i [36].....	24
Slika 15. Rad sustava sa i bez odgovora potrošnje Ren et al. [37].....	25
Slika 16. Usporedba pružanja usluge odgovora potrošnje s obzirom na broj priključnih postaja električnih vozila, Ren et al. [37]	25
Slika 17. Usporedba utjecaja primjene V2V tehnologije s obzirom na broj priključnih postaja [37]	26
Slika 18. Rezultati testiranja baterija prema Harlow et al. [39]. Oznake a), b), c), d), e) i f) označuju različite materijale koji se koriste u bateriji, a C, 2C, 3C, C/20, C/2 označuju snagu punjenja ili pražnjenja	26
Slika 19. Dodatna zarada vlasnika punionice [40]	27
Slika 20. Rezultati primjene odgovora potrošnje u pametnim kućanstvima [43]	28
Slika 21. Kratkoročnost visokih opterećenja [44]	29
Slika 22. Krivulja trajanja opterećenja [45]	29
Slika 23. Odnos maksimalnog opterećenja i vremena [45].....	29
Slika 24. Utjecaj senzualnosti opterećenja (lijevo) na dostupnost odgovora potrošnje (desno)[46]	30
Slika 25. Distribucija relativnog opterećenja uređaja za pranje i sušenje [46]	30
Slika 26. Sudjelovanje pametnih kućanstva na tržištu električne energije [47]	31
Slika 27 Vizija pametne mreže.....	32
Slika 28 Pametno brojilo	33
Slika 29 Prikaz Black box modela	33
Slika 30 Rashladni učinak kompresora za temperaturu isparavanja i kondenzacije.....	34
Slika 31 Međuodnosi sudionika u trgovanju uslugama uravnoteženja	36
Slika 32. Primjena strojnog učenja na primjeru dizalice topline i kotla PTV-a [52]	40
Slika 33 Troškovi omogućavanja odgovora potrošnje u kućanstvima.....	41
Slika 34 Troškovi omogućavanja odgovora potrošnje kod komercijalnih primjena	42
Slika 35 Troškovi omogućavanja odgovora potrošnje kod električnih vozila	43

Slika 36 Trošak omogućavanja odgovora potrošnje iz baterijskih tehnologija.....	44
Slika 37 Troškovi omogućavanja odgovora potrošnje kod industrijskih tehnologija.....	44
Slika 38 Omogućavanje odgovora potrošnje kod komercijalne rasvjete	45
Slika 39 Brzi odgovor potrošnje kod rasvjete	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjena tehnologija odgovora potrošnje prema tipu i prema sektorima [2].....	4
Tablica 2. Dostupna povećanja ili smanjenja opterećenja elektroenergetskog sustava u Hrvatskoj[13].....	11
Tablica 3. Proces i mogućnosti pružanja usluga odgovora potrošnje u industriji [22]	15
Tablica 4. Karakteristike industrijskih procesa u odgovoru potrošnje [22]	16
Tablica 5. Karakteristike odgovora potrošnje kod opreme u sustavima navodnjavanja [32] ..	21

SAŽETAK

Energetski sustavi u tranziciji od proizvodnje temeljene na fosilnim gorivima i centraliziranoj proizvodnji, s visokim emisijama stakleničkih plinova, prema nisko-ugljičnim sustave koji se temelje na promjenljivoj i distribuiranoj obnovljivoj energiji, prolaze kroz različite faze transformacije. U prvim fazama podizanje integracije promjenjivih obnovljivih izvora energije (OIE) može se izvesti u većini konfiguracija energetskog sustava bez implementacije dodatnih tehnologija skladištenja i pretvorbe. U kasnijim fazama, s visokim udjelom varijabilnih OIE, potrebne su sinergije s drugim sustavima kako bi se integrirala najjeftinija i održiva energija. Ovaj projekt bavi se međuodnosima između različitih tehnologija odgovora potrošnje, sektora potrošnje i povezivanja tržišta električnom energijom u energetskoj tranziciji. Uloga tih tehnologija istražuje se iz konteksta tržišnog povezivanja, koje je već u tijeku u Europskoj uniji. U ovom istraživanju, ključno istraživačko pitanje je uravnotežena integracija različitih tehnologija za odgovor potrošnje i “power-to-X” te potrošnje, određivanje njihove optimalne mješavine i izbjegavanje nepotrebnih tehnoloških zaključavanja (“lock-in”). Kako bi se to postiglo, napraviti će se novi moduli za modeliranje ponašanja power-to-X i tehnologija odgovora potrošnje. Također, razradit će se tržišta takvih tehnologija u nastajanju kao i poslovni modeli za njihovu integraciju. To je važan korak u digitalizaciji energetskog sustava i korištenju sinergija kako bi se dekarboniziralo integrirani energetski sustav.

U radnom paketu Prikupljanje najnovijih i relevantnih podataka, prikuplja se informacije i materijale o „power-to-X“ tehnologijama i tehnologijama za odgovor potrošnje, korištenjem rezultata prethodnih projekata provedenih od strane istraživačke grupe, a posebno projekta RESFLEX koji je financirala Hrvatska zaklada za znanost i koji je uspješno završen 2019. godine. Također, suradnja sa suradnicima na projektu koristi se za prikupljanje najnovijih i relevantnih podataka iz ostatka EU-a i iz Kine.

U ovom pregledu, obrađuje se stanje i napredak primjene tehnologija za odgovor potrošnje koje se mogu primijeniti na razini distribucijske elektroenergetske mreže. Takve tehnologije dostupne su u kućanstvima i manjim jedinicama, industriji i uslugama do razine zgrada javne namjene. Prikupljala su se konceptualna istraživanja i podaci o raspoloživosti, vrsti, procijenjenim troškovima te njihovo potencijalno agregiranje. Opisane su sve tehnologije dostupne na tržištu te obećavajući novi koncepti.

SUMMARY

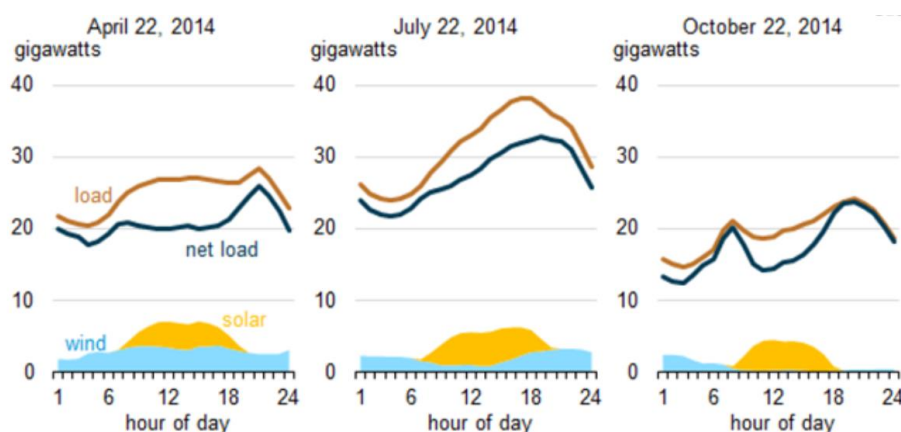
Energy systems in the transition from fossil-based and centralized production, with high GHG emissions, to low-carbon systems based on variable and distributed renewable energy, pass through different phases of transformation. In the first phases, raise of integration of variable renewable energy sources (RES) can be performed in most of energy system configurations without the implementation of additional storage and conversion technologies. In later stages, with a high share of variable RES in the mix, synergies with other systems are needed to integrate the cheapest and sustainable energy. This project deals with interrelation between different power-to-x and demand response technologies and market coupling in the energy transition. Role of these technologies is investigated from the context of market coupling, which is already underway in the European Union. In this research, the key question which is addressed is the balanced integration of different power-to-X and demand response technologies, determining their optimal mix and avoiding unnecessary technological lock-ins. In order to achieve this, new modules will be created to model the behaviour of power-to-X and demand response technologies. Also, emerging markets for such technologies will be elaborated as well as business models for their integration. This is an important step in the digitalization of the energy system and employing the synergies in order to decarbonize multiple systems.

In the work package Collecting the latest and relevant data, information and materials on "power-to-X" and response technologies are collected, using the results of previous projects conducted by the research group, especially the RESFLEX project funded by the Croatian Science Foundation. and which was successfully completed in 2019. Also, collaboration with project contributors is used to collect up-to-date and relevant data from the rest of the EU and from China.

In this review, the state and progress of the application of demand response technologies that can be applied at the level of the distribution electricity network are discussed. Such technologies are available in households and smaller units, industry and services up to the level of public buildings. Conceptual research and data on availability, type, estimated costs and their potential aggregation were collected. All technologies available on the market are described and some promising new concepts included in the review.

1. UVOD

Cilj EU je prema Europskom Zelenom planu [1] do 2050 biti klimatski neutralan kontinent. Ostvarivanje tog cilja se planira uvođenjem dodatnih kapaciteta varijabilnih obnovljivih izvora energije poput energije vjetera i sunca. Ipak, postoje problemi s kojim se u tom slučaju suočavaju operateri elektroenergetskog sustava kao što prikazuje Slika 1. Vidljivo je da je maksimalno opterećenje elektroenergetskog sustava u kasnim poslijepodnevним satima. Do problema dolazi kad se proizvodnja iz, primjerice, fotonaponskih elektrana pod kraj dana počinje naglo smanjivati, dok se u isto vrijeme povećava potrošnja. To znači da je u tom vremenskom periodu potrebno spojiti na mrežu veliki iznos dodatnih kapaciteta, najčešće termoelektrana što dovodi do visokih emisija i cijena električne energije. Iz navedenog je vidljivo da nije moguće postići planirane ciljeve samo uz dodavanje proizvodnih kapaciteta, nego je potrebno i uvođenje mjera povećanja fleksibilnosti sustava. Jedan od takvih sustava je odgovor potrošnje.



Slika 1. „Duck curve“ problem [2]

Odgovor potrošnje, *engl. „demand response“*, definira se kao promjenu potrošnje kod krajnjih kupaca koja se razlikuje od uobičajenih profila potrošnje, kao odgovor na promjene u cijeni električne energije tijekom vremena ili na isplate namijenjene upravo poticanju smanjenja potrošnje električne energije u periodu kad su cijene na veleprodajnom tržištu električne energije visoke ili je ugrožena sigurnost sustava [3]¹.

Dodatne definicije korištene u danjem tekstu su:

- „aktivni kupac“ je kupac ili skupina kupaca koji zajednički djeluju i koji konzumiraju, pohranjuju ili prodaju električnu energiju proizvedenu u njihovom prostoru, uključujući putem agregatora, ili sudjeluju u shemama odgovora potrošnje ili energetske učinkovitosti pod uvjetom da ove aktivnosti ne predstavljaju njihovu primarnu komercijalnu ili profesionalnu djelatnost;
- 'agregator' je tržišni sudionik koji kombinira višestruka opterećenja kupaca ili generiranu električnu energiju za prodaju, za kupnju ili aukciju na bilo kojem organiziranom tržištu energije;
- 'neovisni agregator' je agregator koji nije povezan s dobavljačem ili bilo kojim drugim drugi sudionik na tržištu;

¹ Također, Uredba Komisije (EU) br. 1348/2014

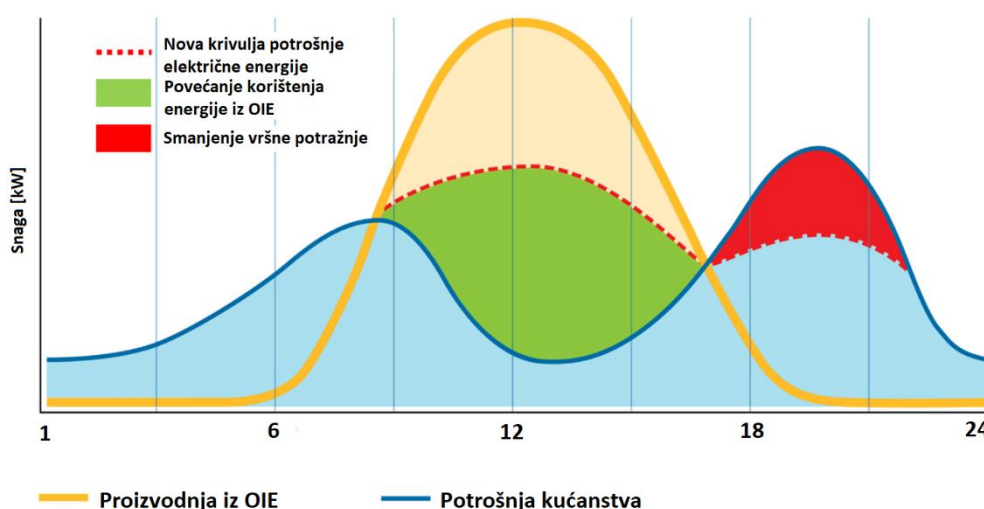
1.1. Podjela odgovora potrošnje prema angažmanu potrošača

Odgovor potrošnje, kao tehnološko rješenje, omogućuje potrošačima da utječu na rad elektroenergetske mreže bitno aktivnije nego prije, smanjujući ili prebacujući potrošnju tijekom perioda vršnog opterećenja, što predstavlja mogućnost potrošačima da sudjeluju na tržištu. Odgovor potrošnje se prema [4] može se kategorizirati u dvije grupe:

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

Eksplicitni odgovor potrošnje podrazumijeva izravan utjecaj na tržištu, kroz balansiranje. Pružatelj eksplicitnog odgovora potrošnje na tržištu se izravno natječe s opskrbom kroz usluge agregatora i pojedinačnih velikih potrošača, a potrošači su izravno kompenzirani za promjene opterećenja.

Implicitni odgovor potrošnje ne dozvoljava sudjelovanje na tržištu, već potrošač izabire biti izložen vremenski promjenjivim cijenama električne energije i/ili tarifama mreže.



Slika 2 Prikaz pomicanja potrošnje radi uravnoteženja sustava [5]

Velik broj kupaca sudjeluje u eksplicitnom odgovoru potrošnje putem agregatora, a u isto vrijeme sudjeluje i u implicitnom ustavu uz prilagođavanje potrošnje kretanju cijena električne energije što može biti na satnoj ili čak nižoj razini, ili pak sustavom noćne i dnevne tarife. Rad i samo provođenje ove dvije vrste odgovora su drugačije, ali rade zajedno. Mogu se aktivirati u razlita vremena i imati različite uloge u tržištu, ali i jednim i drugim je cilj osigurati što niže troškove sustava i veću integraciju varijabilnih izvora energije.

Agregator je pružatelj usluga koji upravlja - izravno ili neizravno - nizom postrojenja u sustavu odgovora potrošnje te tako iz velikog broja malih odgovora potrošnje, primjerice uređaja iz kućanstva, generira veliki odgovor koji može prodavati kao uslugu na tržištu električne energije. Većina potrošača, zbog složenosti sustava kao na primjer kućanstva ne mogu izravno sudjelovati na energetsom tržištu pa im je u tu svrhu potreban agregator koji kombinira velik broj upravljivih opterećenja te time osigurava stabilnost sustava i mogućnost nuđenja usluge regulacije na energetsom tržištu [4]. Vrste opterećenja sadržanih u ovim sustavima mogu biti:

sustavi električnog grijanja i hlađenja, ventilatori, električni kotlovi, brusilice, talionice, pumpe za vodu, zamrzivači itd.

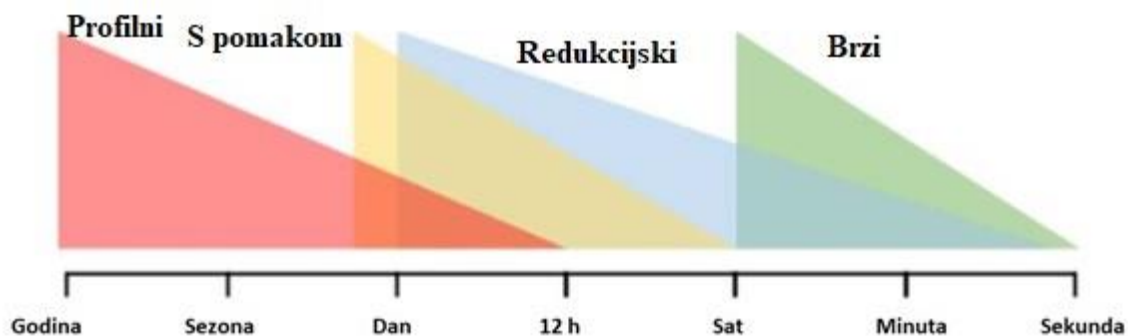
Tijekom planiranja energetske sustava mora se osigurati pokrivanje vršnog opterećenja. Primjenom tehnologija odgovora potrošnje može se smanjiti i ograničiti upotreba vršnih elektrana, koje rade samo mali broj sati tijekom godine, imaju velike troškove i općenito su manje učinkovite. U narednim godinama očekuje se rast potrošnje [6] što predstavlja veliki rizik na preopterećenje trenutnih kapaciteta mreže budući da su one dimenzionirane da zadovolje vršno opterećenje. Primjenom tehnologija odgovora potrošnje ukupna potrošnja se ne smanjuje, ali moguća je redistribucija opterećenja i njena bolja raspodjela kao što prikazuje Slika 2., što dovodi do smanjenja ukupno instaliranih proizvodnih kapaciteta i odgađanja povećanja kapaciteta mreže te time i do ušteda na strani proizvođača kao i kod potrošača [7]. Energija iz vjetrova i sunca, odnosno varijabilni obnovljivi izvori energije (VOIE) zbog vlastite promjenjive proizvodnje predstavljaju izazov u planiranju budućih energetske sustava baziranih na obnovljivim izvorima energije. Tehnologije odgovora potrošnje mogu pružiti brzo uravnoteženje sustava u zadanom vremenskom okviru te se time prilagoditi proizvodnji iz VOIE.

Implementacija odgovora potrošnje zahtjeva modernizaciju elektroenergetske mreže i razvoj infrastrukture. Budući energetske sustavi moraju obuhvatiti i poticati sudjelovanje potrošača u novim pametnim metodama potrošnje energije u kojim bi potrošnja pratila proizvodnju. U mnogim radovima su proučene razne tehnologije fleksibilizacije sustava pa je tako u [8] pokazano kako pametni sustavi skladištenja energije utječu na integraciju VOIE. Tehnologije odgovora potrošnje (power-to-heat i vehicle-to-grid) koristile su se za integraciju solarnih fotonaponskih elektrana u [9]. U [10] je, na vehicle-to-grid konceptu, prikazan energetske sustav otoka koji je baziran samo na varijabilnim obnovljivim izvorima energije u kombinaciji sa skladištenjem u obliku stacionarnih i pokretnih baterija, odnosno vozila koji su povezani na mrežu te punjenjem i pražnjenjem sudjeluju u sustavu. U [11] se analizira integracija krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom električne i toplinske energije u postojećem energetske sustav, tzv. prosumeri.

1.2. Podjela odgovora potrošnje prema vremenskom koraku

Slika 3 prikazuje vrste odgovora potrošnje (Alstone et al. [2]). Odgovori potrošnje mogu imati efekt na razini sekunde pa sve do godišnje razine.

- **Profilni** – ova vrsta odgovora potrošnje se očituje u promjenama samih osnovnih profila opterećenja, a provodi se na razini između planiranja za cijelu godinu do planiranja dan unaprijed. Samo provođenje se osigurava obavijestima i ugovorima o generiranju opterećenja te prikladnom naplatom generiranja opterećenja u određenom vremenu.
- **S pomakom** – koristi se za prebacivanje potrošnje unutar jednog dana. Jedna od najčešćih primjena je izbjegavanje naglog porasta opterećenja kod kasnih poslijepodnevni sati uslijed smanjenja proizvodnje iz solarnih kolektora. Tehnologije koje se koriste u ovu svrhu su spremanje energije unutar kućanstva, zakazivanje vremena punjenja električnih vozila ili predgrijavanja ili predhlađenja prostora.
- **Redukcijski** – određene vrste opterećenja se mogu isključiti iz mreže te na taj način osigurati stabilnost sustava sa smanjivanjem vršnog opterećenja uslijed kojeg bi moglo doći do preopterećenja sustava.
- **Brzi** – ova vrsta odgovora potrošnje se koristi na razini od sekunde do jednog sata. Ovo je najvrjedniji oblik odgovora jer je odgovor na najmanje oscilacije u stabilnosti sustava, a uključuje tehnologije kao baterije i sustave s podesivim opterećenjima kao sustave klimatizacije i hlađenja.



Slika 3. Vrste odgovora potrošnje [2]

1.3. Tehnologije odgovora potrošnje na mikro-razini

Ovaj izvještaj detaljno predstavlja potencijal i značajke svih tehnologija koje mogu služiti u odgovoru potrošnje. U nastavku su navedene neke vrste sustava koje mogu sudjelovati u odgovoru potrošnje:

- Industrijski procesi – najčešće korišteni u redukcijском tipu odgovora potrošnje
- Sustavi grijanja hlađenja i ventilacije (KGH) u stambenim objektima
- Električni pogoni s frekvencijskom regulacijom (VFD)
- Rasvjeta
- Industrijski procesi obrade otpadnih voda i pumpne stanice
- Pumpna postrojenja u poljoprivredi s pumpama upravljanim frekvencijskim regulatorom
- električni kotlovi i bazenske pumpe u kućanstvima
- Podatkovni centri
- Rashladna skladišta
- Skladištenje energije
- Pametno punjenje električnih vozila (EV)
- Javne punionice EV
- Električni sustavi grijanja
- Pametna kućanstva

Tablica 1 donosi podjelu tipičnih tehnologija odgovora potrošnje prema njihovoj primjeni u raznim sektorima.

Tablica 1 Primjena tehnologija odgovora potrošnje prema tipu i prema sektorima [2]

Sektori	Primjena	Opis
Svi	Baterije EV	Razina 1 i 2
	Baterije "Iza mjerača"	Automatizirani odgovor potrošnje (AOP)
Kućanstva	Klimatizacija	Izravna kontrola opterećenja (IKO), Pametni termostati (PT)
	Bazenske pumpe	IKO
Komerrijalni	Klimatizacija	AOP, IKO, PT
	Rasvjeta	Razne opcije
	Hladnjače	AOP
Industrija	Procesi	AOP i ručni prekid procesa

	Poljoprivreda (pumpe)	Ručno, IKO i AOP
	Podatkovni centri	Ručni odgovor potrošnje
	Obrada voda	AOP

2. Tržišta električne energije i tehnologije odgovora potrošnje – osvrt na paket Čista energija i pretpostavke suradnje OPS – ODS u europskoj legislativi

Paket čiste energije definira brojne detalje o suradnji OPS-ODS, aktivnim potrošačima i neovisnim agregatorima. [Prijedlog uredbe Europskog parlamenta i Vijeća o internim pitanjima tržište električne energije \(prerađeno\)](#), 30.11.2016., COM (2016) 861 konačno 2016/0379 (COD) definira potrebu za zajedničkim Europskim entitetom operatora distribucijskog sustava u Uniji ("EU ODS entitet"). Takav EU ODS trebao bi usko surađivati s ENTSO-E-om za električnu energiju u pripremi i primjeni mrežnih kodova tamo gdje je to primjenjivo i treba raditi o pružanju smjernica o integraciji, između ostalog, distribuirane proizvodnje i skladištenja u distribucijske mreže ili druga područja koja se odnose na upravljanje distribucijskom mrežom.

U paketu Čista energija, potrošače se naglašava kao ključni faktor za postizanje fleksibilnosti sustava pri tranziciju prema sustavu temeljenom na varijabilnim, distribuiranim obnovljivim izvorima energije. Tehnološki napredak u upravljanju mrežom i tehnologijama VOIE otvaraju mogućnosti za potrošače i zdrava konkurencija na maloprodajnim tržištima bit će presudna za osiguravanje tržišnog pokreta uvođenje inovativnih novih usluga koje udovoljavaju promjenjivim potrebama potrošača i istodobno povećavaju fleksibilnost sustava. Osnaživanjem potrošača za sudjelovanje na tržištu električne energije na nove načine, građani bi trebali imati koristi od unutarnjeg tržišta električne energije i ciljeva Unije vezanih za obnovljive izvore energije.

U tom smislu, donose se prava potrošača, obaveze zemalja članica i dodatne odredbe vezane uz ugovore potrošača s drugim akterima na tržištu.

2.1. Prava potrošača

Svi potrošači trebali bi imati koristi od izravnog sudjelovanja na tržištu, a posebno prilagođavanjem njihove potrošnje prema tržišnim signalima i za uzvrat korist od nižih cijena električne energije ili drugih poticajnih plaćanja. Prednosti ovog aktivnog sudjelovanja će se s vremenom vjerojatno povećati kada električna vozila, dizalice topline i ostale fleksibilne tehnologije postaju konkurentnije. Stoga:

- Potrošačima treba omogućiti sudjelovanje u svima oblicima odgovora potrošnje i stoga bi trebali imati mogućnost odlučiti se za sustav pametnog mjerenja i ugovor o dinamičnoj cijeni električne energije.
- Sve skupine kupaca (industrijske, komercijalne i kućanstva) trebale bi imati pristup energetsom tržištu radi trgovanja njihovom fleksibilnošću i vlastitom proizvodnjom električne energije.
- Kupcima bi trebalo biti dopušteno u potpunosti iskoristiti prednosti agregacije proizvodnje i ponude na većem, povezanom tržištu, koristeći prednosti prekogranične konkurencije.
- Agregatori će vjerojatno igrati važnu ulogu posrednika između grupa kupaca i tržišta. Transparentna i poštena pravila koja će također omogućiti neovisnim agregatorima da ispune ovu ulogu moraju biti postavljena. Proizvodi bi trebali biti definirani na svim organiziranim tržištima energije, uključujući pomoćne usluge i tržišta kapaciteta kako bi se potaknulo sudjelovanje u odgovoru potrošnje.

- Potrošači bi trebali moći trošiti, skladištiti i prodavati vlastitu proizvedenu električnu energiju na tržištu. Razvoj nove tehnologije olakšat će ove aktivnosti u budućnosti.
- Operatori distribucijskog sustava moraju ekonomično integrirati novu električnu energiju, posebno proizvodnih postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije i nove tehnologije kao što su dizalice topline i električna vozila. U tu svrhu operateri distribucijskog sustava trebaju omogućiti i poticati na korištenje usluga iz distribuiranih energetskih izvora te tehnologije odgovora potrošnje i skladištenja energije, na temelju tržišnih postupaka, kako bi se učinkovito upravljalo mrežom i izbjeglo skupa širenja mreže.
- Države članice trebale bi poduzeti odgovarajuće mjere, kao što su nacionalni mrežni kodeksi i tržišna pravila i poticati operatere distribucijskog sustava putem mrežnih tarifa koje ne stvaraju prepreke za fleksibilnost ili na poboljšanje energetske učinkovitosti u mreži.
- Države članice bi također trebale uvesti planove razvoja mreže za distribucijske sustave kako bi podržali integraciju proizvodnih postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije, olakšati razvoj kapaciteta za spremanje energije i elektrifikaciju prometnog sektora te osigurati korisnicima sustava odgovarajuće informacije u vezi s predviđenim proširenjima ili nadogradnjama mreže, jer trenutno takav postupak ne postoji u većini država članica.

2.2. Ugovor s agregatorom

Da bi se omogućilo lakše i profesionalno upravljanje kapacitetima fleksibilnih tehnologija, odgovora potrošnje i kapacitetima za spremanje energije, agregiranje takvih ponuda se afirmiralo kroz razne projekte u 21. stoljeću. Kako bi to bilo moguće, države članice osiguravaju da, kada krajnji kupac želi sklopiti ugovor s agregatorom, za takav angažman neće biti potreban opskrbljivača energijom.

Također, osigurava se lako sklapanje i raskidanje ugovora, kroz uvjet da krajnji kupac ima pravo na raskid ugovora u roku tri tjedna, bez naknade za raskid koja prelazi izravni ekonomski gubitak za agregatore (uključujući troškove svih povezanih ulaganja ili usluga već dostavljenih krajnjem kupcu kao dio ugovora). Države članice osiguravaju pravo pristupa relevantni podacima o odgovoru na potražnju ili podatke o isporučenoj i prodanoj električnoj energiji najmanje jednom godišnje, za krajnje korisnike.

2.3. Aktivni krajnji korisnici

Prava krajnjih korisnika uključuju i da:

- (a) imaju pravo generirati, skladištiti, trošiti i prodavati vlastitu proizvedenu električnu energiju na organiziranim tržištima, bilo pojedinačno ili putem agregatora, a da nisu podložni nerazmjerno teškim postupcima i naknade koji ne odražavaju troškove;
 - (b) podliježu mrežnim naknadama koje odražavaju troškove, transparentne su i nediskriminirajuće, računovodstveno odvojeno uzimajući u obzir električnu energiju dovedenu u mrežu i utrošenu električnu energiju iz mreže;
2. Energetskom instalacijom potrebnom za aktivnosti aktivnog kupca može se upravljati treća strana za instalaciju, rad, uključujući mjerenje i održavanje.

2.4. Odgovor potrošnje

Države članice osiguravaju da nacionalna regulatorna tijela potiču krajnje korisnike, uključujući one koji nude odgovor potrošnje putem agregatora, kako bi zajedno s generatorima sudjelovali na nediskriminatoran način na svim organiziranim tržištima.

Također, u pogledu suradnje svih dionika, osigurava se da:

- Operateri prijenosnog sustava i distribucijski sustav kada nabavljaju pomoćne usluge, tretiraju pružatelje usluga za odgovor potrošnje, uključujući neovisne agregatore, na nediskriminatoran način, na temelju njihovih tehničkih mogućnosti.
- Regulatorni okvir potiče sudjelovanje agregatora na maloprodajnom tržištu i da sadrži barem sljedeće elemente:
 - (a) pravo svakog agregatora da uđe na tržište bez pristanka drugih sudionika;
 - (b) transparentna pravila koja jasno dodjeljuju uloge i odgovornosti svim sudionicima na tržištu;
 - (c) transparentna pravila i postupci za razmjenu podataka između sudionika na tržištu koji osiguravaju jednostavan pristup podacima pod jednakim i nediskriminirajućim uvjetima uz potpunu zaštitu komercijalnih podataka;
 - (d) agregatori neće biti dužni platiti naknadu dobavljačima ili proizvođačima;
 - (e) mehanizam rješavanja sukoba između sudionika na tržištu.

S ciljem održavanja ravnoteže troškova i koristi koje uzrokuju agregatori pravičnom za sudionike na tržištu, države članice mogu iznimno dopustiti ugovorenu naknadu između agregatora i bilančno odgovornih strana. Takve isplate naknada moraju biti ograničene na situacije u kojima jedan sudionik na tržištu dovodi do neravnoteže za druge sudionike na tržištu, što rezultira financijskim troškovima.

Države članice osiguravaju pristup i potiču sudjelovanje u odgovoru potrošnje, uključujući putem neovisnih agregatora na svim organiziranim tržištima. Države članice će osigurati da nacionalna regulatorna tijela ili, ako to zahtijeva njihov nacionalni pravni sustav, operateri prijenosnog sustava i operateri distribucijskog sustava u uskoj suradnji s pružateljima usluga odgovora potrošnje i krajnjim kupcima definiraju tehničke modalitete za sudjelovanje odgovora potrošnje na tim tržištima na temelju njihovih tehničkih zahtjeva i mogućnosti odgovora potrošnje. Takve specifikacije uključuju sudjelovanje agregatora.

2.5. Zadaci operatora distribucijskog sustava u korištenju fleksibilnosti

Države članice osiguravaju potreban regulatorni okvir koji omogućuje i potiče operatere distribucijskog sustava na nabavu usluga (proizvodnje iz VOIE te odgovora potrošnje) kako bi se poboljšala učinkovitost u radu i razvoju distribucijskog sustava, uključujući upravljanje lokalnim zagušenjima.

Operatori distribucijskog sustava dužni su te usluge nabavljati prema transparentnom, nediskriminirajućem i tržišno utemeljenim postupcima. Oni definiraju standardizirane tržišne proizvode za usluge osiguravajući učinkovito sudjelovanje svih sudionika na tržištu, uključujući obnovljive izvor energije, odgovor potrošnje i agregatore. Operatori distribucijskog sustava moraju razmijeniti sve potrebne informacije i koordiniraju se s operaterima prijenosnih sustava u kako bi se osiguralo optimalno korištenje resursa, osigurao siguran i učinkovit rad sustava i olakšao razvoj tržišta.

2.6. Odgovor potrošnje na tržištima električne energije i uravnoteženja u Hrvatskoj

Pregled stanja nabave energije uravnoteženja i razvoja tržišta pomoćnih usluga u Hrvatskoj temelji se na radu HEP proizvodnje [12]. U razvoju se teži ka praćenju tržišnih signala, smanjenju ili rješavanju zagušenja te integraciji u regionalna tržišta.

Troškovi i naknade koje se uvodi s ciljem pokretanja novih tržišta bit će utemeljene na jasnim, objektivnim i održivim pokazateljima. Razvoj tehnologije je praćen kontinuiranim napretkom u primjeni te se prate mogućnosti i prednosti naprednih tehnoloških rješenja u energetsom sektoru. Posebno se pažnja posvećuje suvremenim informacijsko-komunikacijskim tehnologijama i posebnim primjenama. Omogućava se planiranje, aktivacija i ostvarivanje regulatornih usluga te sinergijskih efekata za usluge uravnoteženja.

Regulativa RH u području pomoćnih usluga i energije uravnoteženja temelji se na dokumentima:

- Metodologija za određivanje za pružanje pomoćnih usluga (HOPS 7/2016) i Pravila
- Metodologija za određivanje cijena za pružanje usluge uravnoteženja (NN 85/2015)
- Metodologija za određivanje cijena za obračun uravnoteženja (NN 76/16, 112/16)
- Mrežna pravila prijenosnog sustava (NN 87/17); ENTSO-E pravila OH, reg. rezerve

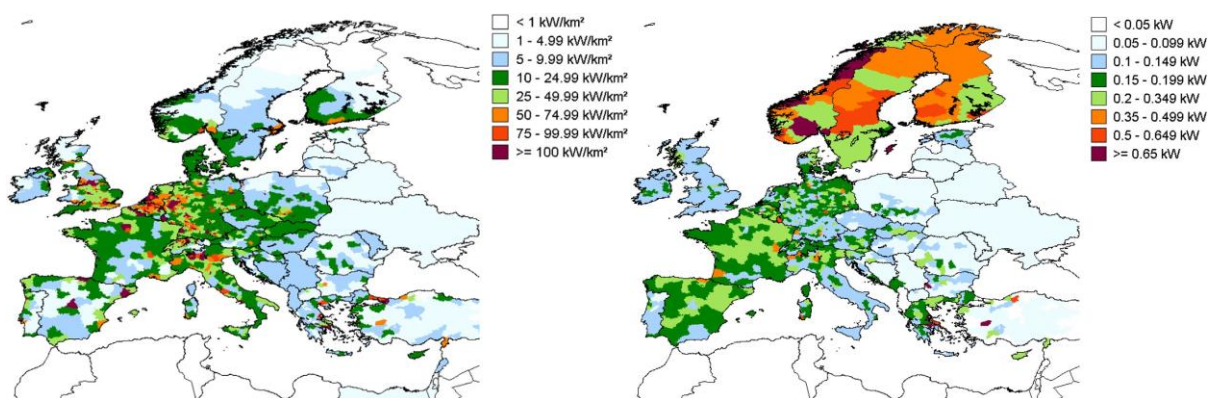
Razvija se koncept zakupa regulacijskog opsega prema potrebama HOPS-a po cijenama s veleprodajnog tržišta električnom energijom. Propisani su verifikacijski postupci za regulacijske usluge i usluge rezerve. Od 2010. do 30.06.2014. paušalni obračun usluga utemeljen je na postotku potrošnje, od 01.07.2014. obračun se vrši po pojedinačnim pomoćnim uslugama, uz razvoj uspostave regulative. HEP Proizvodnja je obavezni pružatelj usluga do otvaranja tržišta pomoćnih usluga. Usluga primarne regulacije frekvencije je obveza proizvođača koja se ne naplaćuje. Četiri akumulacijske HE pružaju uslugu automatske sekundarne regulacije ASR (aFRR): HE Zakučac, HE Senj, HE Vinodol, HE Dubrovnik (2018, AG-A za RH, AG- B za BIH). Uz suglasnost HERA-e, HEP-Proizvodnja i HOPS sklapaju 6 pojedinačnih ugovora godišnje. Od 2018. je uvedena mogućnost drugim pružateljima usluge uravnoteženja, ugovor za upravljanje potrošnjom, min 1 MW, trajanje 0,5-2 h, za aktivaciju 15 min. Operator distribucijskog sustava nema ugovore za pružanje pomoćnih usluga.

3. Implicitni i eksplicitni odgovor potrošnje

Na strani potrošača se poduzeti postupci definiraju mogu svrstati u neki od ovih postupaka: vremensko pomicanje vršnih opterećenja, preraspodjela opterećenja da se dio opterećenja pomakne u vremenski raspon niskog opterećenja, uklanjanje visokih vršnih opterećenja te spremanje energije. Također, postavljaju se pitanja kako strana potrošnje može sudjelovati u reguliranju varijabilnosti proizvodnje:

- Svojevoljno ili na zahtjev operatora
- Koje vrste opterećenja mogu sudjelovati u regulaciji
- Koji iznos potrošnje je dostupan za usluge balansiranja mreže
- U kojim vremenskim rasponima je potrošnja dostupna za balansiranje
- Koja se količina energije može skladištiti na strani potrošača

Vremenski odmak potrošnje energije u raznim sektorima se većinom kreće u rasponu od nekoliko sati, dana, ili pak sezonski [13]. odmak potrošnje može biti aktivan ili pasivan što znači da je ili nije u nadležnosti krajnjeg korisnika ili pak operatora bez interakcije s korisnikom. Neke vrste potrošnje se mogu odmaknuti na zahtjev operatora bez obzira na okolnosti, za neka su uvedena ograničenja, a neka su pak ovisna o vremenskim uvjetima. Odmak potrošnje može imati negativan i pozitivan učinak na očekivani rad uređaja koji se koristi u reduciranju potrošnje. Osnovno je pravilo da se ne dopušta u potpunosti prekinuti rad uređaja, ali ga je potrebno prilagoditi potrebama mreže.



Slika 4. Prikaz potencijala smanjenja (lijevo) i povećanja (desno) opterećenja u Europi,

[13]

Na području Europe postoje značajni potencijali za implementacijom fleksibilnosti koji se kreću od 61 do 172 GW u smislu smanjenja opterećenja ili 68 do 499 u smislu povećanja opterećenja u mreži (Gils et al. [13]). Donja vrijednost je dostupna tokom cijele godine, dok je iznos vrijednosti koji je veći od donje vrijednosti ovisan o vremenskim uvjetima i ostalim okolnostima. Detaljni prikaz dostupnih tehnologija, njihovih specifikacija te vremenskih okvira unutar kojih su dostupne se može pronaći u Bertsch et al. [14] i Gils et al. [13]. Relevantne potencijale za Hrvatsku donosi Tablica 2.

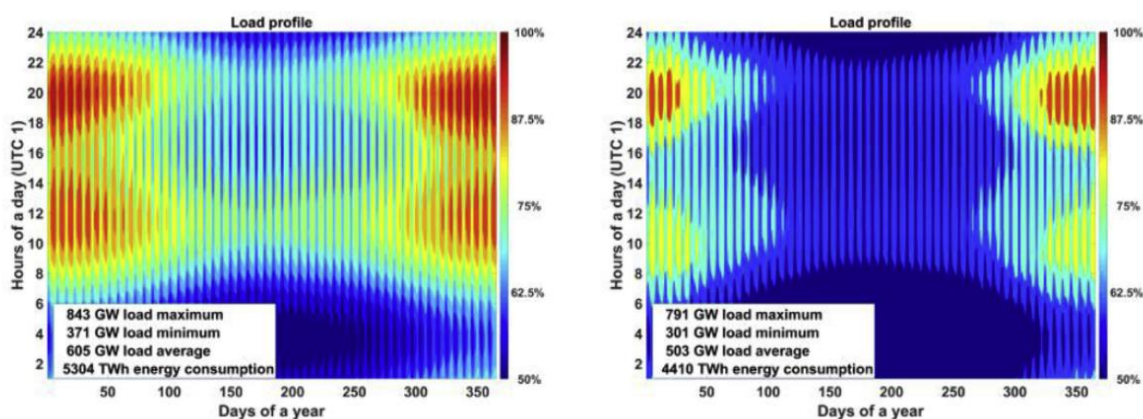
Tablica 2. Dostupna povećanja ili smanjenja opterećenja elektroenergetskog sustava u Hrvatskoj[13]

Proces	Smanjenje opterećenja	Povećanje opterećenja
Jedinica	MW	MW
Industrija aluminija	0	0
Industrija bakra	0	0
Industrija cinka	0	0
Industrija klora	0	0
Pamučna industrija	8	2
Industrija papira	5	3
Reciklaža papira	0	0
Proizvodnja čelika	35	0
Proizvodnja cementa	49	12
Kalcijev karbid	0	0
Zračna separacija	0	0
Hlađenje u industriji	10	9.3
Ventilacija u industriji	3	0
Hlađenje u trgovinama	39	0
Hlađenje skladišnih prostora	5	4
Hlađenje hotela i restorana	8	6
Ventilacija u komercijalnom sektoru	76	0
Hlađenje u komercijalnom sektoru	24	0
Skladištenje topline u komercijalnom sektoru	0	108
Grijanje skladišnih prostora	0	0
Vodovod	18	15
Postrojenje za obradu voda	4	5
Hladnjače	106	0
Perilice rublja	37	223
Sušila rublja	3	20
Perilice posuđa	10	60
Hlađenje u sektoru kućanstva	37	0
Skladištenje topline u kućanstvima	0	199
Električni grijač u kućanskom spremniku topline	0	294
Cirkulacijske pumpe	28	0

Odgovor potrošnje predstavlja vrlo značajnu mogućnost fleksibilnosti. Povijesno gledano, operateri sustava koristili su ručno rasterećenje opterećenja sustava kako bi održali sigurnost i pouzdanost mreže tijekom izvanrednih događaja i hitnih situacija. Ipak, iako potrebne, takve primitivne mjere regulacije odgovora potrošnje su potrebne kako bi se spriječio katastrofalan kvar mreže no nisu najbolji način za zaštitu stabilnosti sustava. Ručno rasterećenje opterećenja ne predstavlja optimalno rješenje kao i automatsko rasterećenje sustava odbacivanjem opterećenja podfrekventnim i podnaponskim osiguračima što je također na neki način grubi oblik odgovora potrošnje. Današnji se sofisticiraniji sustavi odgovora potrošnje razlikuju od povijesnih i mogu biti važna komponenta integracije OIE. Fleksibilnost na strani potrošnje koju pruža odgovor potrošnje može povećati pouzdanost mreže i osigurati značajna smanjenja emisija stakleničkih plinova ubrzanom integracijom sve povoljnijih varijabilnih obnovljivih izvora energije. Prema procjenama tvrtke „Baltimore Gas and Electric Company“, troškovi integracije sustava odgovora potrošnje iznose US\$165/kW, što je tri do četiri puta jeftinije od izgradnje nove vršne elektrane čija se cijena kreće između US\$600–800/kW. Vidljivo je iz ove usporedbe koliko je sustav odgovora potrošnje bolja opcija od puke izgradnje novih kapaciteta vršnih elektrana koji bi vršili istu zadaću, ali uz višu cijenu i više emisije. U Child et al. [15]

dan je prikaz važnosti prosumera u razvitku mreže koji može rezultirati čak 17% smanjenjem preuzete energije iz mreže na godišnjoj razini te smanjenjem vršnog opterećenja od 6%.

Christinsen et al. [17] prikazuje probleme koji mogu nastati u slučaju implementacije odgovora potrošnje s aktivnim sudjelovanjem potrošača. Ističe se da se u većini prijašnjih istraživanja pretpostavljalo da se potrošači ponašaju racionalno u skladu s varijabilnim cijenama električne energije kao indikatorom povoljnosti korištenja određenih uređaja te imaju predodžbu o potrošnji energije u vlastitom kućanstvu, no ta se pretpostavka dokazala pogrešnom u brojnim istraživanjima prema Hargreaves et al. [18], Hargreaves et al. [19] i Strengers et al. [20]. Stoga, potrebno je promijeniti percepciju o potrošaču i njegovu interakciju sa sustavom. Jedan od načina koji predlaže Christinsen, [17] je uz edukaciju i izloženost idejama energetske učinkovitosti te mogućim učincima vremenske promjene određenog opterećenja. Primjerice, zbog izloženosti, ali i više razine obrazovanja u smislu rada energetskih sustava, vlasnici kućnih fotonaponskih sustava posvećuju veću pažnju vremenu korištenja određenih uređaja kako bi u najvećoj mogućoj mjeri iskoristili vlastitu energiju. Sličan princip uz odgovarajuće obrazovanje bi se mogao primijeniti i na široj populaciji. Osnova ovog znanja već postoji, a reflektira se u dnevnoj i noćnoj tarifi, ali je potrebno dodatno obrazovanje kako bi se od strane potrošača prepoznala dnevna kretanja cijena.



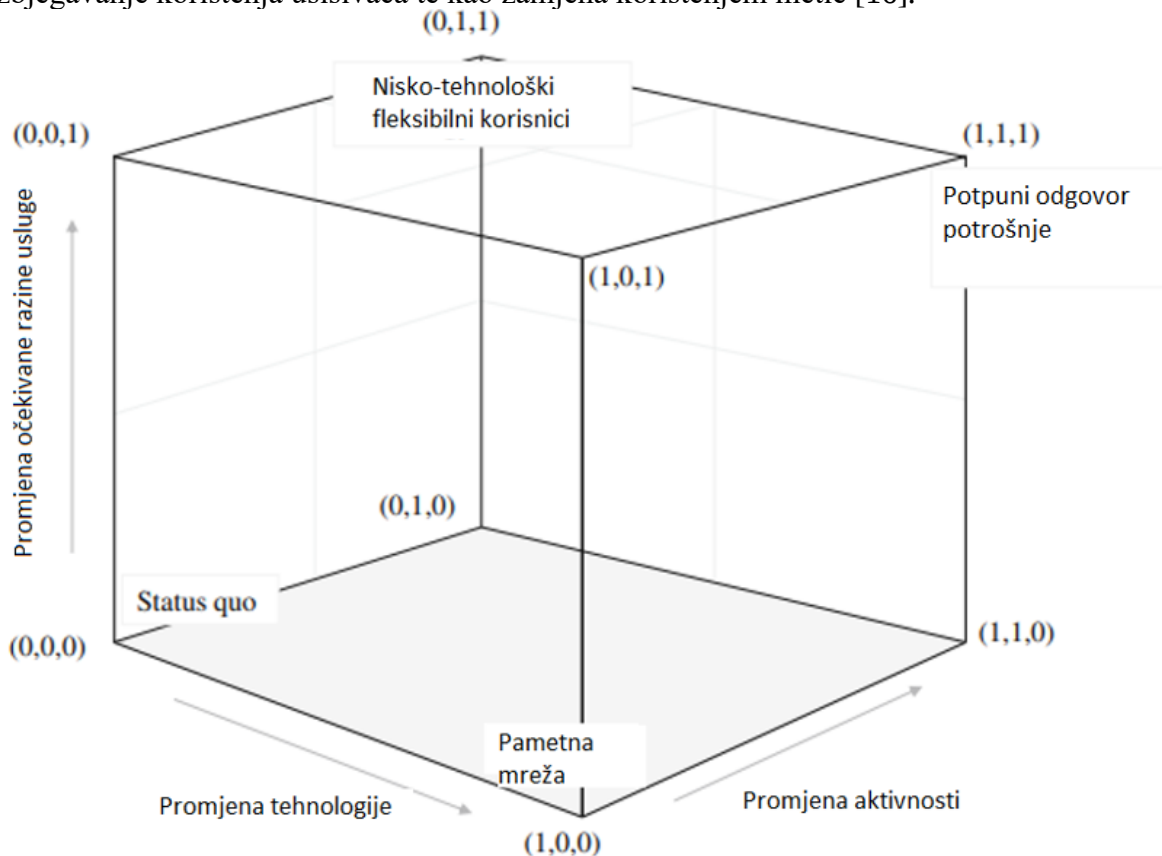
Slika 5. Usporedba scenarija bez potrošača s vlastitom proizvodnjom prosumera (lijevo) te scenarija s potrošačima s vlastitom proizvodnjom (desno), ([15])

Nekoliko važnih učinaka može se postići primjenom programa odgovora potrošnje: smanjiti ukupnu potrošnju električne energije i račune za električnu energiju krajnjih korisnika, velikim kupcima pružiti naknadu u zamjenu za njihovu „raspoloživost za isključivanje“, smanjiti potrebu za drugim izvorima fleksibilnosti (vršne elektrane ili kapacitet pohrane) te smanjiti nestabilnost mreže tokom izvanrednih događaja u sustavu.

Vremenski podesiv odgovor potrošnje se već koristi u velikoj mjeri u državama kao Francuska gdje se razdoblja najveće potražnje javljaju relativno redovito, zbog visokog stupnja zastupljenosti sustava električnog zagrijavanja stanova. Sustavi dinamičnih cijena su u fazi demonstracije, a različiti regionalni pilot programi pokazuju ohrabrujuće rezultate u smislu smanjenja opterećenja. Ovaj pristup je posebice učinkovit kad se koristi zajedno s centralnim sustavima klimatizacije i električnim sustavima za pripremu potrošne tople vode. Hitni odgovor potrošnje je zreliji poslovni model jer je prvenstveno namijenjen na mali broj velikih industrijskih ili komercijalnih potrošača.

Sustavi odgovora potrošnje se mogu podijeliti i prema tome što zahtijevaju od krajnjeg korisnika. Ti pogledi se mogu predstaviti uz pomoć 3 dimenzije: promjena tehnologije, promjena aktivnosti te promjena očekivane razine usluge. Kako bi se postigao potpuni odgovor

potrošnje, potrebno je primijeniti sve 3 od dimenzija. Promjena tehnologije podrazumijeva uvođenje uređaja kompatibilnih s pametnim kućanstvima kao pametna brojila, hladnjak, KGH sustav, pohrana energije, itd. uz korištenje navedenih uređaja kao što su KGH sustavi primjerice, može se očekivati određene promjene u toplinskoj ugodnosti te vremenu rada sustava. Promjena aktivnosti podrazumijeva inicijativu od strane korisnika za obavljanjem određenih zadataka koji zahtijevaju veće količine energije ili u drugo vrijeme ili na drugi način. Primjerice odgoditi čišćenje usisivačem u vrijeme nižih cijena električne energije ili kompletno izbjegavanje korištenja usisivača te kao zamjena korištenjem metle [16].



Slika 6. Dimenzije i vrste odgovora potrošnje [16]

3.1. Implicitni odgovor potrošnje

Jedan od najvažnijih parametara u elektroenergetskom sustavu je održavanje frekvencije mreže unutar dozvoljenih granica. Kako bi se osigurala stabilnost sustava, operator je primoran poduzeti mjere stabilizacije neovisno o krajnjim potrošačima. To se naziva frekvencijskim odgovorom operatora prema Liu et al.[21] te se predlaže četiri razine hijerarhije.

- A. Rad više proizvodnih jedinica kako bi se osigurala rotirajuća rezerva. Ovaj postupak ima za posljedicu rad proizvodne jedinice na minimalnoj ili blizu minimalne snage zbog čega dolazi do niže učinkovitosti pogona, a time do većih specifičnih emisija CO₂ po kWh i porasta operativnih troškova. Također, smanjuje se količina preuzete energije iz vjetroelektrana i fotonaponskih sustava.
- B. Prilagodba dopuštenog odstupanja frekvencije s trenutnih 5% na 3% omogućuje brži odgovor

- C. Odgovor potrošnje kao dio regulacije frekvencije. Odaziv u redu veličine nekoliko stotina milisekunda ili desetak perioda u sustavu izmjenične struje. Za usporedbu, postrojenja koja vrše primarnu regulaciju se prilagođavaju potražnji unutar nekoliko sekunda. Ovaj tip regulacije frekvencije je uspješno testiran u SAD-u sa dostupnom regulacijom u iznosu od 1,4 GW.
- D. Generiranje umjetne inercije sustava uz pomoć upravljačkih sustava izvora energije zasnovanih na pretvaračima energije. Ovo uključuje vjetroelektrane varijabilne brzine vrtnje, fotonaponske sustave i sustave pohrane energije primjerice u baterijama. Ni jedan od ovih sustava nije vezan na sinkronu mrežu putem kontinuirane rotacije rotora unutar statora, nego simulacijom iste putem elektronike što ovu vrstu uređaja čini brzim u regulaciji frekvencije.

3.2. Eksplicitni odgovor potrošnje

Za učinkovitu provedbu odgovora potrošnje potrebna je prisutnost naprednog ICT-a (informacijske i komunikacijske tehnologije) i dobro poznavanje opterećenja samog sustava. Odgovor potrošnje predstavlja skup mjera namijenjenih za korištenje opterećenja i lokalne proizvodnje za potporu u radu i upravljanju cijelog sustava i općenitom poboljšanju kvalitete opskrbe električnom energijom. Ipak, stvarni ostvarivi potencijal odgovora potrošnje ovisi o: dostupnosti i pravovremenom pružanju informacija potrošačima, trajanju i vremenskom periodu pružanja usluga od strane potrošača, radu ICT sustava, implementaciji mjerenja potrošnje u stvarnom vremenu, automatizaciji nekih sustava kod samih korisnika te pravilnom financijskom kompenzacijom pružene usluge definirane putem cijena i ugovora. Takve usluge mogu uključivati prebacivanje opterećenja, generiranje opterećenja u periodima slabog opterećenja, snižavanje vršnih opterećenja, dinamičko upravljanje energijom, poboljšanje energetske učinkovitosti i strateški rast opterećenja. Kao primjer može poslužiti jednostavni dnevni profili kućnog opterećenja za ilustraciju funkcije svake usluge. Uvođenjem pametnog mjerenja potrošnje i razvojem tehnologija automatizacije kućnih prostora, kućanski uređaji mogu se kontrolirati na inteligentniji način, što donosi veću fleksibilnost na strani potražnje. U tom slučaju sam oblik opterećenja postaje fleksibilan i njime se može upravljati u skladu s potrebama sustava. Međutim, za najučinkovitiji odgovor potrošnje nije dovoljno dati operatoru sustava podatak o tome koji sustavi su prisutni, već i koji su u uporabi. Time se ostvaruje dvosmjerna komunikacija između pametnog brojila i operatora sustava. Jedan od načina za dekarbonizaciju sektora grijanja i transporta je elektrifikacija, primjerice, uz povećanje zastupljenosti dizalica topline i električnih vozila. Međutim, neposredna posljedica ovog pristupa je povećanje opterećenja u elektroenergetskom sustavu što može prouzročiti potencijalno ozbiljne probleme kako u sustavu distribucije, tako i u sustavu proizvodnje. Stoga, potreban je odgovarajući sustav kontrole i upravljanja kako ne bi došlo do preopterećenja nekog postrojenja.

Budući programi odgovora potrošnje bit će vjerojatno više usmjereni na stambeni sektor (kako bi se implementacija ovakvih sustava proširila s komercijalnog i industrijskog sektora) s dinamičnim cijenama i naprednom mjernom infrastrukturom koja će omogućiti brzu komunikaciju između opterećenja i operatora sustava (ili agregatora zaduženog za pojedini dio sustava).

3.3. Industrijski procesi

Industrijski procesi sudjeluju u osnovnom tipu odgovora potrošnje karakterizirani niskom cijenom. Koriste se već danas kao redukcijski tip odgovora potrošnje prestankom opskrbe

određenih potrošača. Ipak, poželjno je prilagođavanje potrošnje prema unaprijed dostupnim informacijama o proizvodnji kako prikazuje Tablica 3., a Tablica 4. prikazuje ograničenja samih procesa (Starke et al. [22]).

Tablica 3. Procesi i mogućnosti pružanja usluga odgovora potrošnje u industriji [22]

Vrsta procesa	Minimalno trajanje	Maksimalno trajanje	Ograničenja upotrebe	Vrsta usluge
Pakiranje	0.5 h	1 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Hlađenje	0.5 h	1 h	Manje od jednom dnevno	Rezerva i fleksibilnost
			Kontinuirano unutar određenog vremenskog perioda	Regulacija
			1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Omatanje	1 h	1 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Tkanje	1 h	1 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Šivanje	0.5 h	1 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Obrada metala	0.5 h	1 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Sječa drvene materije	1 h	4 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Procesi izdvajanja vlage prešanjem	0.5 h	1 h	Manje od jednom dnevno	Rezerva i fleksibilnost
			Kontinuirano unutar određenog vremenskog perioda	Regulacija
			1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Elektroliza	4 h	8 h	Manje od jednom dnevno	Rezerva i fleksibilnost
			Kontinuirano unutar određenog vremenskog perioda	Regulacija
			1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Kompresor	1 h	3 h	Manje od jednom dnevno	Rezerva i fleksibilnost
			Kontinuirano unutar određenog vremenskog perioda	Regulacija
			1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Brušenje	1 h	4 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Katalitičko karikiranje	0.5 h	1 h	Manje od jednom dnevno	Rezerva i fleksibilnost
			Kontinuirano unutar određenog vremenskog perioda	Regulacija

			1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Procesi miješanja	0.5 h	1 h	Manje od jednom dnevno	Rezerva i fleksibilnost
			Kontinuirano unutar određenog vremenskog perioda	Regulacija
			1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Procesi mljevenja	0.5 h	1 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Električne peći	0.5 h	1 h	Manje od jednom dnevno	Rezerva i fleksibilnost
			Kontinuirano unutar određenog vremenskog perioda	Regulacija
			1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Drobljenje	1 h	4 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Elektroliza	4 h	8 h	Manje od jednom dnevno	Rezerva i fleksibilnost
			Kontinuirano unutar određenog vremenskog perioda	Regulacija
			1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Drobljenje i separacija	1 h	4 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Rezanje metala	1 h	4 h	1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija
Završno sklapanje	0.5 h	1 h	Manje od jednom dnevno	Rezerva i fleksibilnost
			Kontinuirano unutar određenog vremenskog perioda	Regulacija
			1 do 2 puta dnevno uz obavijest 4 do 8 sati prije korištenja	Kapacitet i energija

Tablica 4. Karakteristike industrijskih procesa u odgovoru potrošnje [22]

Proces	Brz odgovor unutar	Normalan odgovor unutar
Pakiranje	5 minuta	10 minuta
Hlađenje	30 sekunda	10 minuta
Omatanje	5 minuta	10 minuta
Tkanje	5 minuta	10 minuta
Šivanje	5 minuta	10 minuta
Obrada metala	5 minuta	10 minuta
Sječa drvene materije	5 minuta	10 minuta
Izdvajanje vlage prešanjem	30 sekunda	10 minuta

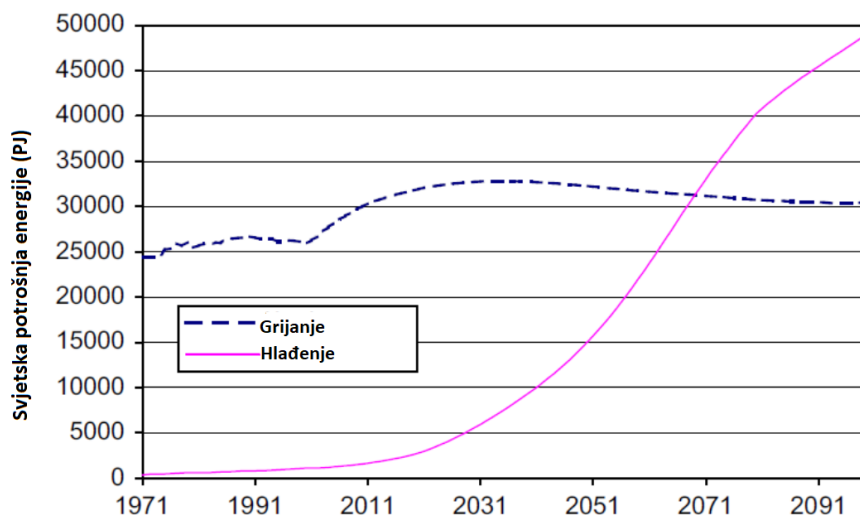
Elektroliza	30 sekunda	10 minuta
Kompresor	30 sekunda	10 minuta
Brušenje	5 minuta	10 minuta
Katalitičko kreiranje	30 sekunda	10 minuta
Proces miješanja	30 sekunda	10 minuta
Proces mljevenja	5 minuta	10 minuta
Električna peć	30 sekunda	10 minuta
Drobljenje	5 minuta	10 minuta
Elektroliza	30 sekunda	10 minuta
Drobljenje i separacija	5 minuta	10 minuta
Rezanje metala	5 minuta	10 minuta
Završna obrada	30 sekunda	10 minuta

3.4. Termostatska električna opterećenja

Termostatska opterećenja su opterećenja električnom energijom na koja ne utječe samo režim krajnje uporabe, već i klimatski uvjeti [23]. Primjeri ove vrste opterećenja su sustavi grijanja i hlađenja, poput dizalica topline (zrak, voda) i električnih kotlova. Vremenski režim ovih opterećenja ovisi o uređajima regulacije temperature ili termostatima koji se aktiviraju kada je opterećenje potrebno i isključe kada su uvjeti u prostoriji prihvatljivi i nema potrebe za daljnjim radom uređaja. Raširena upotreba ovih uređaja u kućanstvu dovodi do najvećih opterećenja elektroenergetskih sustava u najhladnijim i najtoplijim danima u godini. Stoga se moraju primijeniti pametni načini rada kako bi se izbjegli negativni utjecaji na elektroenergetske sustave i utjecalo na cijene na tržištu električne energije. Prema podacima iz istraživanja, oko 12% električnog opterećenja na godišnjoj razini unutar Europe je osjetljivo na temperaturne promjene, što utječe na tržišne cijene. Iako ne samo zbog ovog utjecaja, prosječne cijene električne energije u Francuskoj su tokom zime u periodu od 2014 do 2018 bile su gotovo 20 eura / MWh više u odnosu na cijene tokom ljeta. ("Electrification Can Cut Emissions of Transport, Buildings and Industry in Europe by 60% by 2050" 2020)

Potrošnja energije prouzrokovana termostatskim opterećenjem proporcionalna je broju korištenih uređaja (difuzija tehnologije) i klimatskim uvjetima. Na povećanje broja uređaja utječe i razmjer očekivanog globalnog zatopljenja, posebice u Južnoj Europi, te rast prihoda (Issac et al. [24], Patteuw et al. [25]). Razdioba potražnje za električnom energijom ovog tipa se uvelike razlikuje u ovisnosti o geografskom položaju. Primjerice, na području sjeverne Europe dolazi do neravnoteže u profilu s većom potražnjom tijekom hladnijih zima i manjom potražnjom za hlađenjem zbog blažih ljeta. U južnoj Europi pak potražnja za toplinom iz električnih uređaja zimi i potražnja za hlađenjem ljeti imaju uravnoteženiji profil tijekom godine. Također, energetske sustave južne Europe su nepovoljnijoj poziciji u odnosu na sjeverne, npr. Španjolska je u nepovoljnijoj poziciji od Švedske (Dowling et al.[26]), gdje se očekuje da će potražnja za hlađenjem doseći 20% ukupne potražnje za energijom u kućanstvima i sektorima usluga.

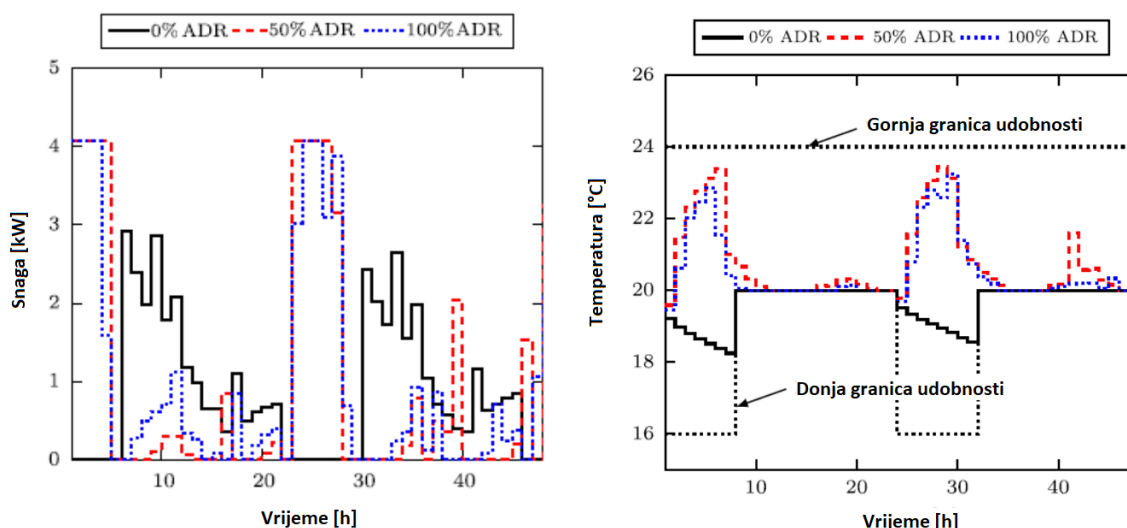
U budućnosti bi utjecaj klimatskih promjena na potražnju za grijanjem i hlađenjem mogao biti značajan i različit, ovisno o dijelu svijeta, općenito se može očekivati da se potražnja za grijanjem može smanjiti više od 30%, dok se potražnja za hlađenjem može povećati više od 70% (Issac et al. [24]). Stoga, potrebno je klimatske utjecaje uključiti u modele predviđanja potražnje za energijom za grijanje i hlađenje kako bi se u te modele uklopile značajne promjene koje se očekuju u sve većoj mjeri prema kraju stoljeća, kao što prikazuje Slika 7.



Slika 7. Očekivano kretanje potrošnje energije u sustavima hlađenja [23]

Sektor grijanja i hlađenja prostora je pod velikim utjecajem klimatskih promjena. Iako će se tijekom stoljeća dogoditi stabilizacija potražnje za grijanjem, potražnja za hlađenjem će postati sve značajnija u drugoj polovici stoljeća. Stoga bi se trebalo više usredotočiti na potražnju za hlađenjem i njezinu fleksibilnost.

Fleksibilnost termostatskih opterećenja leži u vremenskoj inerciji procesa zagrijavanja i hlađenja prostora, koja je nekoliko puta veća od varijabilnosti OIE. Zbog ove činjenice, ukupno opterećenje sustava grijanja i hlađenja bi se moglo podijeliti u gotovo neograničen broju odvojenih procesa na satnoj ili ispod satne distribucije koji nisu u korelaciji, pa stoga ne dolazi do velikih porasta potražnje. Preduvjet za uvođenje ovakvog sustava je oprema za praćenje i upravljanje procesom u stvarnom vremenu na strani potrošača, koja omogućava opskrbu dovoljnih količina energije u skladu s granicama razine udobnosti potrošača, bez posebnih zahtjeva za vremenom isporuke.



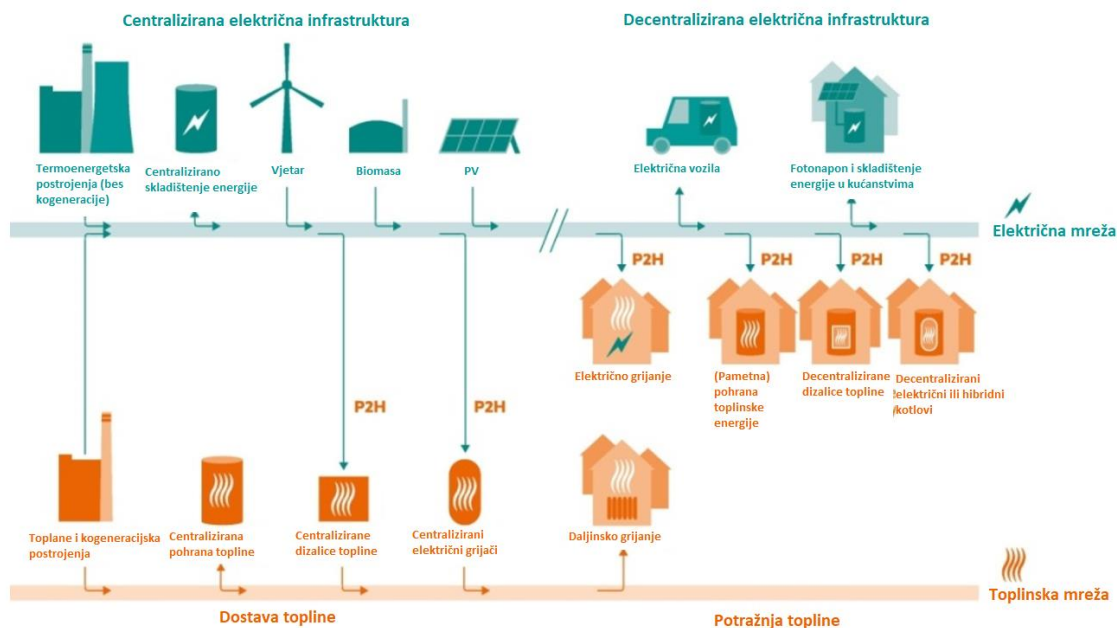
Slika 8. Optimizirana potražnja za električnom energijom (lijevo) za zagrijavanje jednog domaćinstva sa satnim sustavom aktivnog odgovora potrošnje (ADR) (0-100%) s ciljem optimizacije u vidu najnižih troškova uz istodobno zadovoljavanje ograničenja toplinske udobnosti (desno) tijekom dva zimska dana [25]

Rad električnih grijača se može prebaciti s vremenskog perioda u kojem se nalaze sati s visokom cijenom na onaj s nižom cijenom električne energije koji se javlja u periodu kad je u mreži prisutan veliki iznos energije generiran iz OIE. Na taj se način uz regulaciju sustava grijanja osigurala fleksibilnost sustava uz integraciju visokog iznosa energije iz varijabilnih izvora električne energije.

Zbog povezanosti s vremenskim uvjetima, raspodjelu ove vrste opterećenja, a time i raspoloživost tehnologija odgovora potrošnje je moguće predvidjeti iz meteoroloških prognoza te na taj način unaprijed planirati optimalno korištenje sustava na obostranu korist krajnjeg potrošača i operatora elektroenergetskog sustava (Mathieu et al. [7]).

3.5. Konverzija električne energije u toplinsku ili rashladnu energiju uz primjenu dizalica topline i otporničkih grijača

Tehnologije pretvorbe električne u toplinsku energiju su obećavajuće tehnologije u smislu odgovora potrošnje kako na centraliziranim, tako i na decentraliziranim sustavima. Slika 9 prikazuje tokove energije u centraliziranim i decentraliziranim sustavima odgovora potrošnje i skladištenja energije. Tehnologije koje pružaju fleksibilnost na razini nacionalnih energetske sustava imaju značajnu ulogu u planiranju europskog elektroenergetskog sustava s visokim udjelom obnovljivih izvora energije ovisno o klimatskim uvjetima (Yimalz et al. [27]). Faktor pretvorbe električne energije u toplinsku (Koeficijent grijanja krat. COP od engl. „Coefficient of Performance“) se kreće od $COP=1$ (otpornički grijači) do 5-6 s već dostupnim dizalicama topline do čak 7 u većim visokoučinkovitim sustavima ili pak 10 što je teoretski maksimalan iznos. Iako je električno zagrijavanje putem otporničkih grijača s investicijske strane puno jeftinija tehnologija od dizalica topline, nakon otprilike 3000 sati rada u punom opterećenju godišnje, zbog nižih pogonskih troškova, dizalica topline postaje ekonomski povoljnija od grijača. Osim otporničkog zagrijavanja, izvor fleksibilnosti je i skladištena toplina u obliku tople vode u spremniku koji se naziva spremnik topline ili električni kotao (uz uvjet prisutnosti otporničkog grijača).

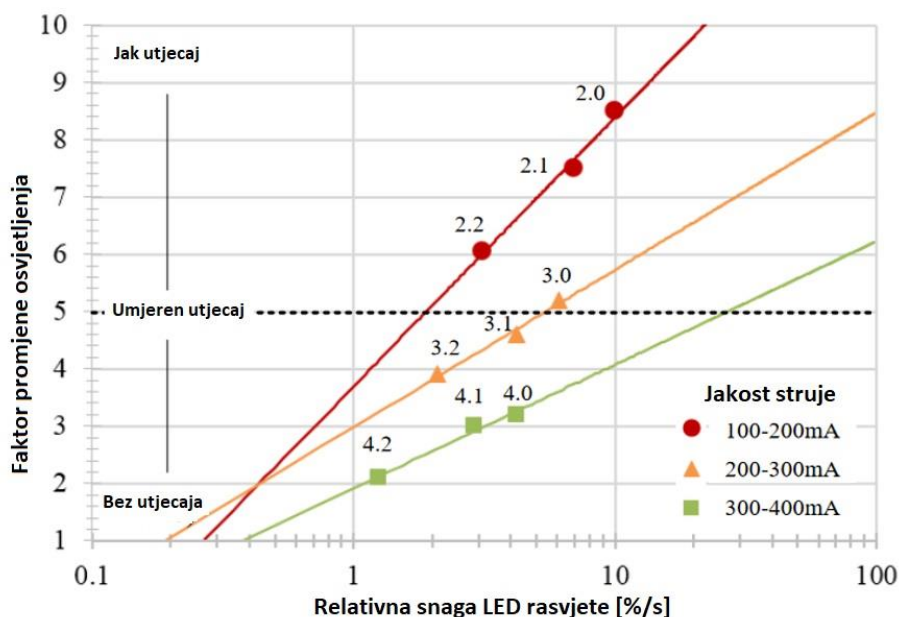


Slika 9. Tehnologije pretvorbe električne u toplinsku energiju na centraliziranim (lijevo) i decentraliziranim (desno) sustavima (Bloess et al.[28])

Tehnologije pretvorbe električne energije u toplinsku energiju se smatraju najfleksibilnijim i prvim izborom brzog odgovora potrošnje (ispod sekunde). Važnost električne energije za tehnologije grijanja bit će dalje objašnjena u sljedećem poglavlju pod konceptom povezivanja sektora. Postavlja se pitanje održivosti korištenja električne energije u svrhu grijanja što pak ovisi o samom elektroenergetskom sustavu. Stoga, uz uvjet da je sustav održiv, održiv je i koncept grijanja putem električne energije. Također, uz primjenu sustava skladištenja, energija putem koje se generirala uskladištena toplina mora biti održivog porijekla kako bi potrošač imao održivu energiju. U budućnosti se zbog povećanja temperatura očekuje povećanje potražnje za hlađenjem (klimatizacija) s blizu 300 TWh u 2000. na oko 4000 TWh u 2050. i više od 10.000 TWh u 2100 (Vaghefi et al. 2014 [29]) što je uglavnom potaknuto povećanjem prihoda, a time i životnog standarda u zemljama u razvoju [24]. Ovaj dio opterećenja bi se mogao izdvojiti iz satne distribucije ostatka opterećenja elektroenergetskog sustava.

3.6. Rasvjeta

Iako je u sustavima rasvjete prisutan značajan potencijal za korištenje rasvjete u odgovoru potrošnje, postoje potrebe za implementacijom dodatnih tehnologija u sustave rasvjete, ali većina potencijalnih korisnika je već investirala u modernizaciju sustava rasvjete u posljednjem desetljeću. Rasvjeta nije pogodna za odgovor potrošnje vremenskim pomakom, ali je moguća regulacija opterećenja unutar kratkog vremena ispod ili unutar nekoliko sekunda. Slika 10. prikazuje mogućnosti korištenja LED sustava rasvjete za potrebe odgovora potrošnje i regulacije frekvencije mreže, zbog mogućnosti brzih promjena opterećenja bez bitnog utjecaja na samog korisnika što je moguće zbog ljudske percepcije svjetlosti u logaritamskom načelu (Lee et al. [30]).

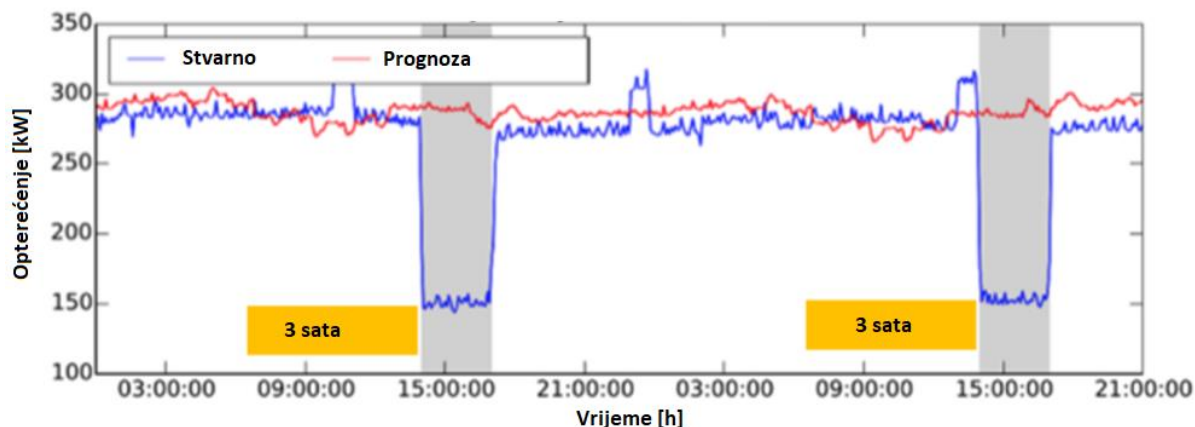


Slika 10. Percepcija promjene svjetlosti, Lee et al. [30]

3.7. Industrijski procesi obrade otpadnih voda

Industrijski procesi obrade otpadnih voda i pumpne stanice – visok potencijal na mnogim lokacijama, ali ova vrsta postrojenja je uvijek u pogonu što ograničava primjenu odgovora

potrošnje isključivanjem iz pogona. Moguća je primjena pumpa s frekvencijskom regulacijom brzine vrtnje, ali prisutni su problemi s ekonomskom isplativosti primjene ove tehnologije. Prema istraživanju korištenja postrojenja za obradu otpadnih voda na primjeru jednog postrojenja u Kaliforniji (Aghajanzadeh et al.) [31], dolazi se do podataka da ova vrsta postrojenja često radi u djelomičnom opterećenju ostavljajući dio kapaciteta u rezervi. Time se otvara mogućnost premještanja određenih opterećenja gašenjem određenih dijelova opreme u jednom vremenskom periodu i uključivanjem u nekom drugom periodu pri povećanoj snazi. Primjerice, na promatranom slučaju, postrojenje se sastoji od 7 aeratora, a u normalnom radu, samo 3 rade dok je ostatak u rezervi. Postrojenje sadržava 4 cirkulacijske pumpe, a 2 rade pri tipičnom opterećenju. Jedan od primjera vođenja sustava prikazuje Slika 11.



Slika 11. Mogućnosti prilagodbe opterećenja u postrojenjima za obradu otpadnih voda [31]

3.8. Pumpna postrojenja u poljoprivredi

Pumpna postrojenja u poljoprivredi s pumpama upravljanim frekvencijskim regulatorom – ova vrsta pumpa u kombinaciji sa sustavima navodnjavanja ima visok potencijal i ograničenu ili nikakvu potrebu interakcije s korisnikom. Ipak, trenutno su sve pumpe u ovoj vrsti primjene ručno upravljive. Također, potrebno je napomenuti da sam učinak ove vrste regulacije može značajno varirati na godišnjoj razini zbog varijacija u količini padalina.

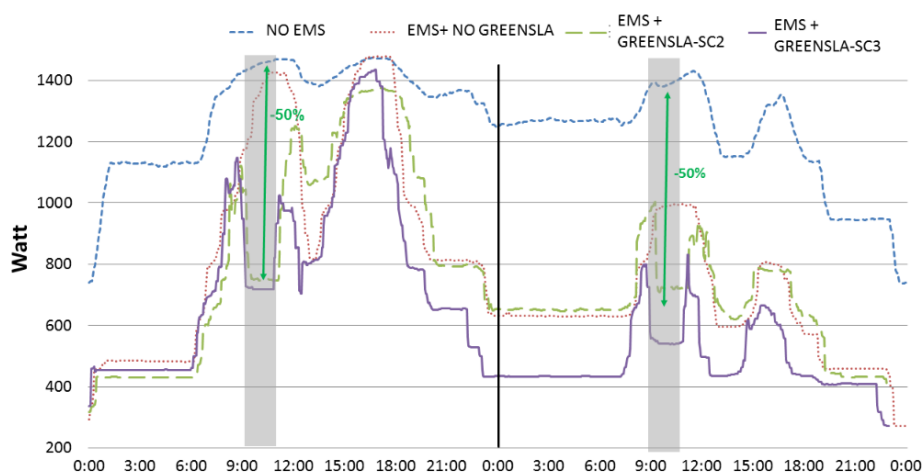
Tablica 5. Karakteristike odgovora potrošnje kod opreme u sustavima navodnjavanja [32]

Oprema	Automatizacija	Red veličine brzine odgovora	Dostupna fleksibilnost	Granice primjene
Dubinska pumpa	Ručno	Nekoliko minuta do nekoliko sati	100%	Potrebna je prethodna najava, usklađenje planova te reorganizacija rada
Površinska pumpa	Djelomično automatizirano	Nekoliko sekunda do nekoliko minuta	100%	Ograničeno raspodjelom vode i dostupnim količinama vode
Dodatna „booster“ pumpa	Djelomično automatizirano	Sekunde	100%	Ograničeno planovima navodnjavanja i karakteristikama sustava
Dubinska pumpa + frekvencijsko upravljanje	Automatizirano	Minute	Varira	Frekvencijsko upravljanje nije prikladno kod sustava s visokom visinom dobave
Površinska pumpa + frekvencijsko upravljanje	Automatizirano	Sekunde	Varira	Ograničeno raspodjelom vode i dostupnim količinama vode

Dodatna „booster“ pumpa + frekvencijsko upravljanje	Automatizirano	Sekunde	Varira	Ograničeno planovima navodnjavanja i karakteristikama sustava
Vodosprema	Djelomično automatizirano	Nekoliko sata do dana	Varira	Izgradnja vodospreme predstavlja veliku investiciju te nije česta kod većine sustava
Vlastita proizvodnja električne energije	Automatizirano	sekunde	Varira	Moguća ograničenja od strane operatora sustava

3.9. Podatkovni centri

Mnogi procesi u podatkovnim bi se centrima mogli preraspodijeliti bez utjecaja na sveukupni rad sustava. Time podatkovni centri postaju fleksibilni i mogu sudjelovati u vremenskoj preraspodjeli potrošnje. Proces koji imaju potencijal za preraspodjelom su serijske operacije koje nisu kritički ovisne o vremenu i sustavi hlađenja samog podatkovnog centra. Ipak, postoji velika mogućnost da će upravitelj centra biti nevoljan predati kontrolu nad centrom operatoru energetskeg sustava. Iznimka ovom pravilu može biti slučaj korištenja stvarnih cijena električne energije jer u tom slučaju dolazi do inicijative od strane vlasnika podatkovnog centra za smanjenjem potrošnje u određenim vremenskim periodima. Odgovor potrošnje je moguć jer su podatkovni centri često vezani ugovorima koji propisuju određenu dostupnu snagu, ali često je stvarno korištenje podatkovnog centra od strane koja iznajmljuje njegove usluge znatno manje pa time ostaje veliki neiskorišteni potencijal u samoj procesorskoj snazi centra. Slika 12 prikazuje moguće modifikacije rada sustava s ciljem smanjivanja troškova uz prebacivanje opterećenja u period nižih cijena električne energije, modificiranje rada sustava hlađenja te isključivanje i uključivanje jedinica prema potrebi [33].

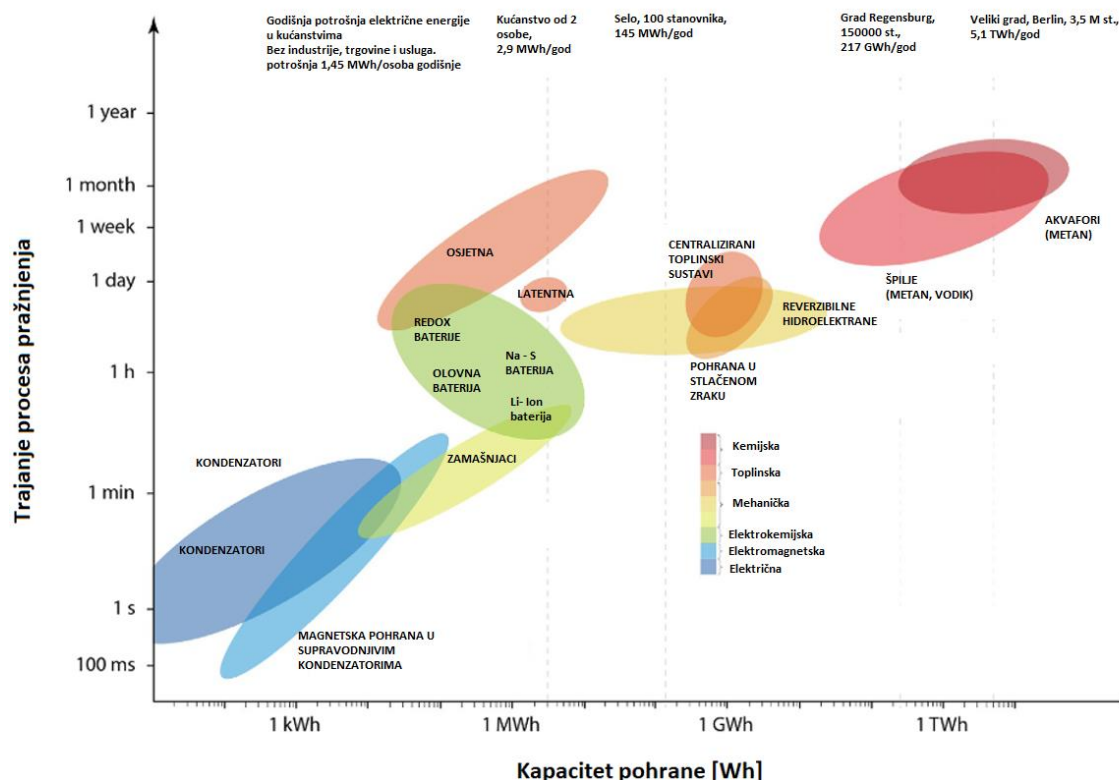


Slika 12. Potrošnja energije u podatkovnom centru sa i bez korištenja mjera odgovora potrošnje [33]

3.10. Sustavi skladištenja energije

Odgovor potrošnje odgodom potrošnje i odgovor generiranjem opterećenja ovise prvenstveno o sustavu pohrane energije. Primjerice, neke vrste pohrane energije već postoje kao akumulacija toplinske energije unutar mase građevine. Slika 13. prikazuje dostupne tehnologije pohrane energije. Na razini kućanstva s pohranom do 2,9 MWh godišnje se nalazi pohrana u obliku [34]:

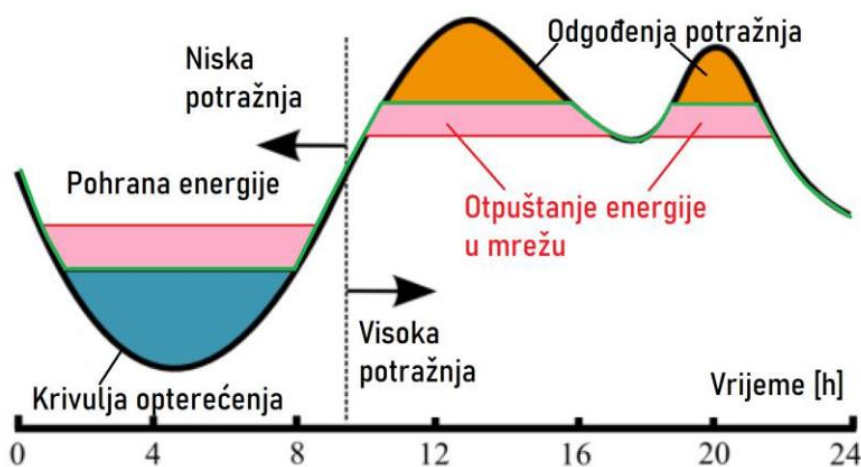
- Kondenzatorske baterije- mogućnost isporučivanja i pohranjivanja visokim snagama punjenja ili pražnjenja, ali ograničenog kapaciteta. Stoga, koriste se u vrlo specijaliziranim namjenama kao usklađivanje napona unutar elektroenergetskog sustava.
- Pohrana u supravodljivim materijalima - pohrana i isporuka velike količine energije i snage, ali postoje brojni izazovi u primjeni zbog zahtjeva za održavanjem sustava na temperaturama blizu apsolutne nule ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Zamašnjaci – energija se pohranjuje u obliku rotacijske energije. Prisutni su problemi sa nemogućnošću iskorištavanja cjelokupne pohranjene energije zbog ograničenja rada električnog generatora.
- Stacionarne elektro-kemijske baterije – postoji velika količina različitih baterija za primjenu u raznim uvjetima, od pohrane kapaciteta od nekoliko MWh kod baterija malih uređaja sve do reda veličine GWh za stacionarnu pohranu velikih količina električne energije. Visok potencijal za odgodom potrošnje, ali skupo s početnom cijenom iznad at \$100/kW uz korištenje baterija.
- Pohrana toplinske energije u obliku osjetne ili latentne topline. Pohrana u obliku osjetne topline se već sad koristi u sustavima grijanja ili pripreme potrošne tople vode. Odgovor potrošnje je u ovom slučaju moguć prilagođavanjem vremena rada sustava. Sustavi s pohranom energije u obliku latentne topline se koriste u više specijaliziranim primjenama kod nekih vrsta sustava klimatizacije i uređaja kao perilica posuđa, a funkcioniraju na principu oslobođenja ili akumulacije topline kod promjene agregatnog stanja medija.
- Električna vozila – Predstavljaju novu kategoriju opterećenja s visokim potencijalom odgovora potrošnje. Optimalno bi se opterećenje punjenja električnih vozila trebalo prebaciti u vremenski period tokom noći kad su cijene električne energije niske ili u period oko podneva kad dolazi do prekomjerne proizvodnje iz fotonaponskih sustava.



Slika 13. Sustavi pohrane energije, Stadler et al. [34]

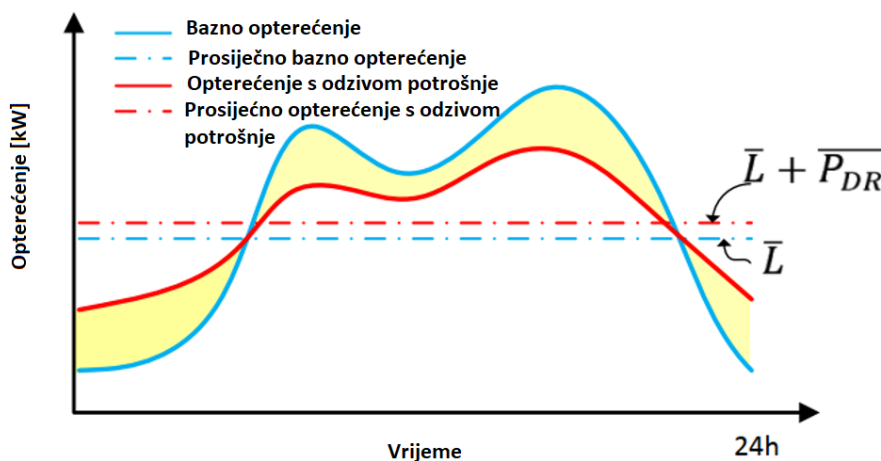
3.11. Vozilo na mreži

Tehnologija engl. „*Vehicle to grid*“ (V2G) koja je unaprijeđeni oblik tehnologije pametnog punjenja električnih vozila predstavlja veliki potencijal zbog očekivane tranzicije prema elektromobilnosti, a time i velikim brojem vozila na električni pogon. Iako „vozilo na mreži“ samo po sebi nije tehnologija odgovora potrošnje, već tehnologija za skladištenje i balansiranje energetskog sustava, pojavljuje se na razini distribucije i stoga se promatra u ovom poglavlju. Tehnologija pametnog punjenja je tehnologija odgovora potrošnje, jer upravo omogućava reakciju potrošača (punionice) na uvjete u mreži i na tržištu električnom energijom. Slika 14. prikazuje jednu od mogućnosti vođenja sustava uz punjenje kad je potrebno preuzeti viškove energije iz mreže te pražnjenje kad dolazi do pada proizvodnje iz varijabilnih izvora ili porasta opterećenja mreže.

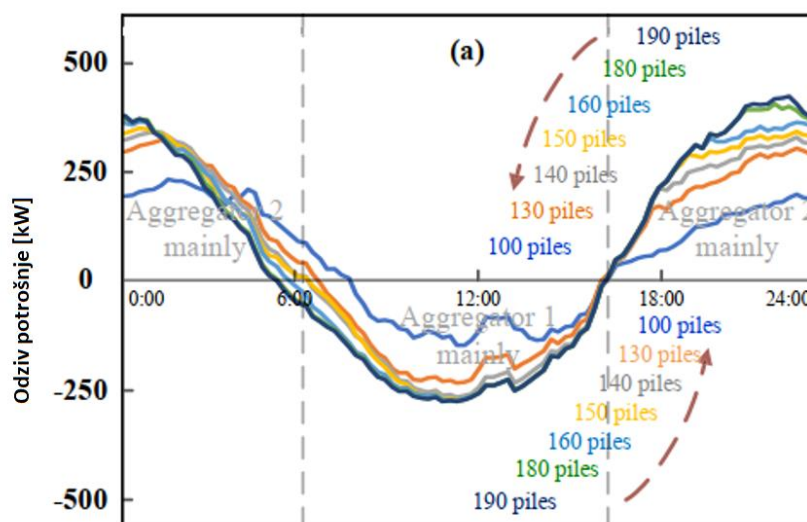


Slika 14. Primjena V2G i tehnologije pametnog punjenja u smislu odgovora potrošnje, prilagođeno iz [35] i [36]

Prema Ren et al. [37], Slika 15. prikazuje usporedbu elektroenergetskog sustava sa i bez primjene odgovora potrošnje. Vidljivo je da se u slučaju korištenja odgovora potrošnje snižavaju maksimalne vrijednosti, a povećavaju niske vrijednosti opterećenja što doprinosi stabilnosti sustava, ali i nižim investicijama zbog izbjegavanja izgradnje određenih vršnih kapaciteta. Slika 16. prikazuje rezultate primjene V2G tehnologije. Razmatra se nekoliko slučajeva koji se razlikuju po broju instaliranih priključnih postaja za električna vozila. Vidljivo je da sustavi s većim brojem priključaka, ali jednakim brojem vozila, pružaju bolje rezultate u pružanju usluge odgovora potrošnje na način da se tokom noćnih sati generira dodatna potražnja, a tokom najopterećenijih sati koji se nalaze tokom prijedpodneva i poslijepodne, dolazi do neto negativne potrošnje, tj. do isporučivanja energije u mrežu.



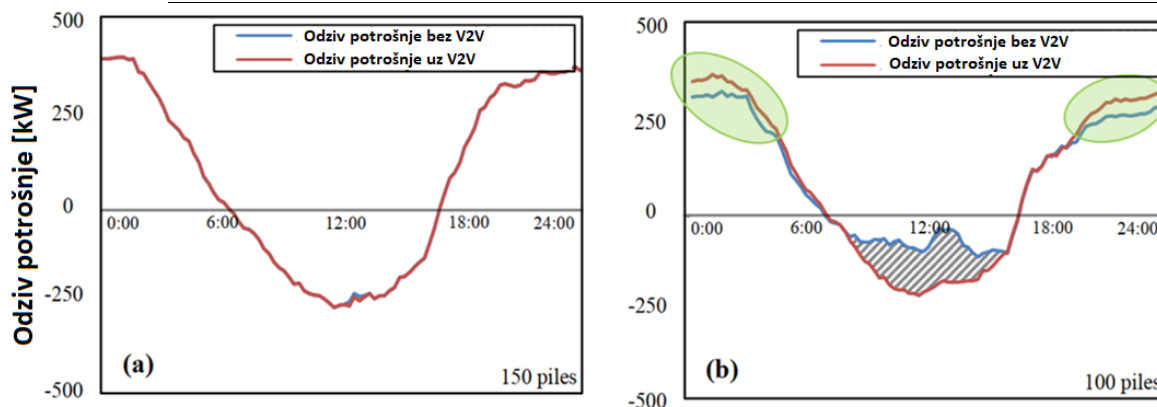
Slika 15. Rad sustava sa i bez odgovora potrošnje Ren et al. [37]



Slika 16. Usporedba pružanja usluge odgovora potrošnje s obzirom na broj priključnih postaja električnih vozila, Ren et al. [37]

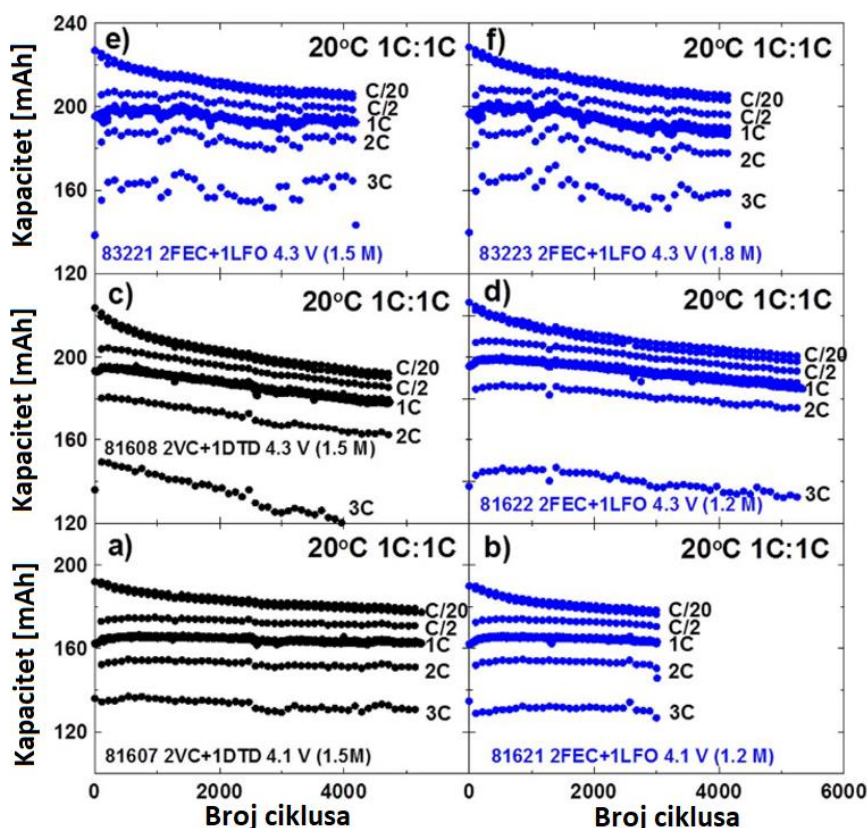
„Vehicle-to-vehicle“ koncept je idejno zamišljen kao tehnologija kojom se više električnih vozila priključenih na istu lokalnu mrežu povezuje i razmjenjuje energiju bilateralno. Također, moguća je primjena agregatora [38].

Slika 17. prikazuje razliku za slučaj korištenja i ne korištenja tehnologije V2V. Učinkovitost ove tehnologije ovisi o instaliranom broju priključnih postaja, time da je viša učinkovitost V2V što je manji broj priključnih postaja i obratno. V2V daje najbolje rezultate uz manji broj priključnih postaja zbog toga što se omogućuje veća predaja energije u mrežu uz dodatne transfere energije među samim vozilima.



Slika 17. Usporedba utjecaja primjene V2V tehnologije s obzirom na broj priključnih postaja [37]

Također, trendovi u razvoju električnih baterija ukazuju na povećanje broja ciklusa punjenja i pražnjenja baterije uz ograničeni iznos gubitka prvotnih karakteristika baterije što omogućuje primjenu baterija u sustavima s očekivanim visokim brojem ciklusa punjenja i pražnjenja. Slika 18. prikazuje rezultate testiranja baterija [39]. Vidljivo je da veći dio prikazanih rezultata prikazuje mali ili gotovo nikakav gubitak kapaciteta čak i uz 6000 ciklusa punjenja i pražnjenja.

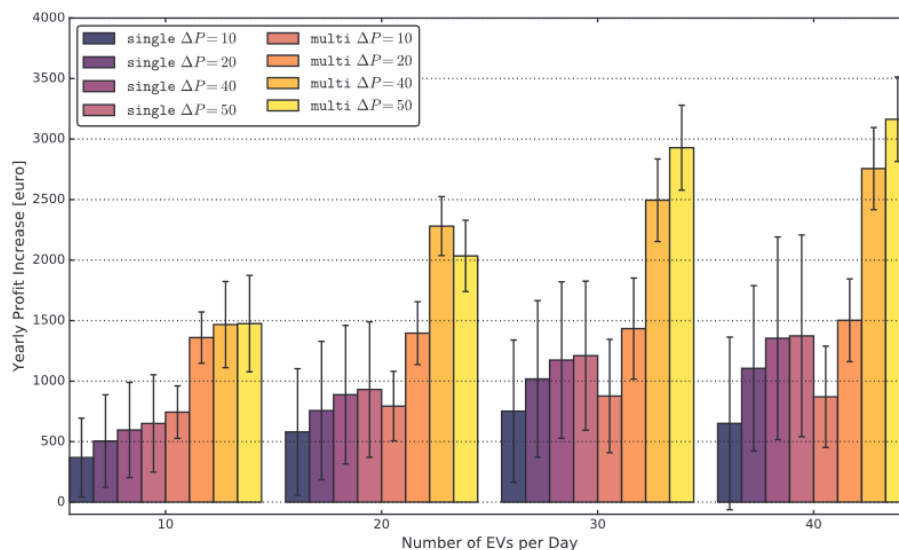


Slika 18. Rezultati testiranja baterija prema Harlow et al. [39]. Oznake a), b), c), d), e) i f) označuju različite materijale koji se koriste u bateriji, a C, 2C, 3C, C/20, C/2 označuju snagu punjenja ili pražnjenja

3.12. Javne punionice električnih vozila

Limmer et al. [40], istražuju utjecaj povećanja prihoda vlasnika punjača na način da se računalnim algoritmom vodi odabir redoslijeda punjenja te ograničavanja snage punjenja. Instalirana snaga javnih punionica može doseći snage i od nekoliko MW s obzirom na sve veće

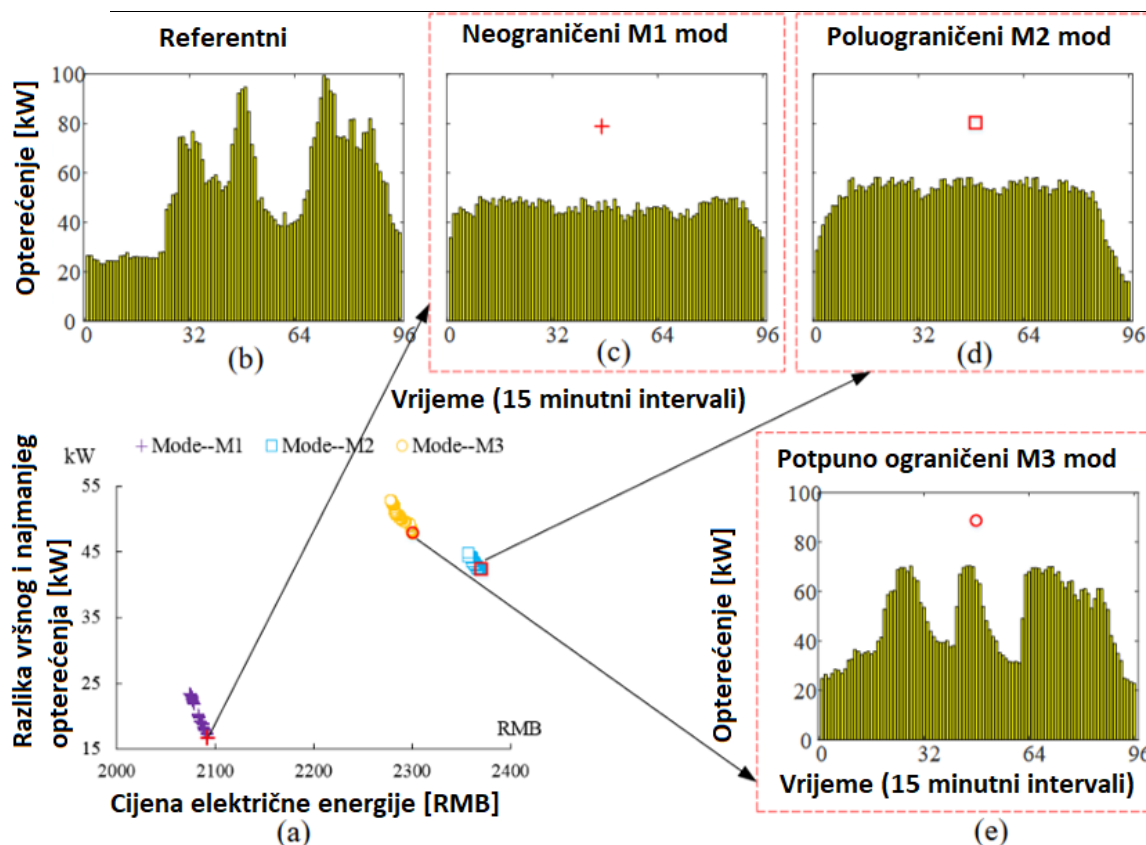
kapacitete punjača ([41], [42]). Stoga, pruža se mogućnost regulacije isporučivane snage te na taj način optimizacija troškova kako korisnika, tako i vlasnika punjača te u isto vrijeme pružanja usluge odgovora potrošnje. Duže čekanje ili snižena snaga punjenja se korisniku nadoknađuje korigiranjem troškova punjenja. Rezultati prikazuju da se na uzorku od 10 opsluživanih korisnika dnevno, dodatna zarada kreće između 400 i 1500 €/godišnje te raste s porastom broja korisnika. Iz navedenog je vidljivo da se uz napredno vođenje sustava punjenja električnih vozila mogu ostvariti i dodatni prihodi uz istovremeno pružanje usluga odgovora potrošnje koje može biti uz izravnu kompenzaciju ili uz prilagođavanje vođenja sustava punjenja prema cijenama električne energije kao indikatoru potrebe za povećanjem ili smanjenjem opterećenja.



Slika 19. Dodatna zarada vlasnika punionice [40]

3.13. Pametna kućanstva

Pametna kućanstva – „Smart home“ su koncept koji se zasniva na uvođenju međusobno zavisnih i povezanih tehnologija, najčešće putem interneta. Ovaj koncept se djelom bazira na kombinaciji već spomenutih tehnologija kao što su sustavi grijanja i hlađenja, uređaji s mogućnošću kontrole brzine vrtnje, rasvjeta, pohrana energije i električna vozila. Uvođenjem ovih tehnologija se dodaju nove funkcionalnosti i pogodnosti samim korisnicima. Jedna od dodatnih funkcionalnosti je omogućavanje interakcije kućanstva i operatora elektroenergetskog sustava u stvarnom vremenu i na taj način ostvarivanje odgovora potrošnje. Kombinacijom ovih tehnologija se u značajnom djelu može vremenski premjestiti opterećenje i stabilizirati sustav. Slika 20. prikazuje rezultate primjene odgovora potrošnje u pametnim kućanstvima. Uspoređuju se 3 varijante vođenja sustava sa referentnim sustavom, a prate se potraživana energija z određenom periodu i trošak implementacije. Vidljivo je da M1 sustav daje najbolje rezultate uz gotovo potpunu eliminaciju vršnih opterećenja. Uz to pruža najniži trošak zbog nedostatka potrebe za izgradnjom dodatnih kapaciteta namijenjenih pokrivanju samo vršnih opterećenja (Yu et al. [43]).



Slika 20. Rezultati primjene odgovora potrošnje u pametnim kućanstvima [43]

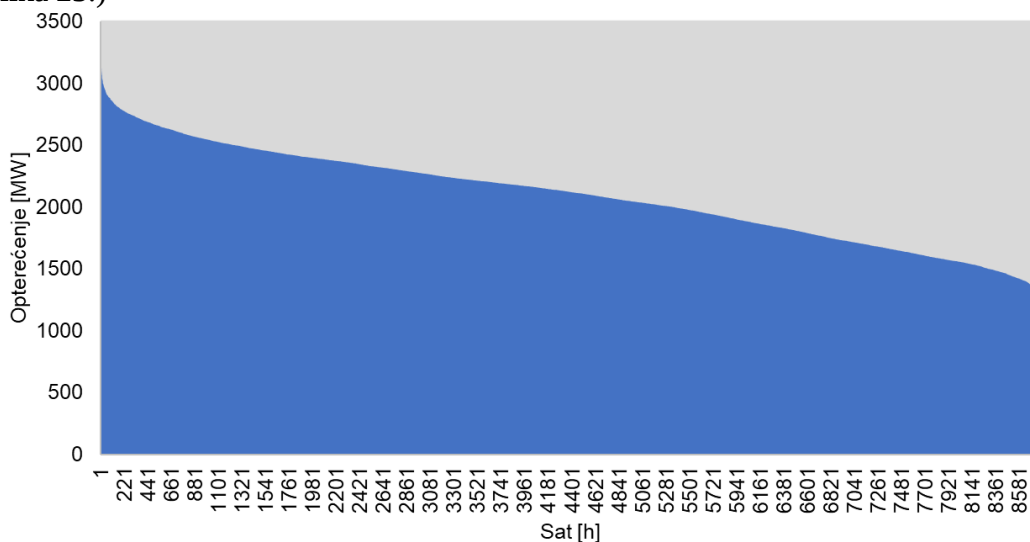
Chen et al. [44] također predstavlja rezultate uvođenja odgovora potrošnje korištenjem metoda primjenjivih u pametnim kućanstvima u provinciji Jiangsu u Kini. Prema podacima o potražnji, dnevne varijacije mogu iznositi čak 27 % ukupnog maksimalnog opterećenja sustava. Primjerice, maksimalno opterećenje 2013. godine iznosi 2800 GW, dok minimalno opterećenje isti dan iznosi 2058 GW, što daje razliku od 742 GW unutar samo nekoliko sati. Slika 21. prikazuje krivulju trajanja opterećenja. Vidljivo je da sustav radi iznad 95 % maksimalnog opterećenja manje od 80 sati godišnje što nije racionalni način pogona sustava jer zbog malog broja radnih sati potrebno imati visoki instalirani kapacitet. Jiangsu provincija je tokom 2015. i 2016. uvela sustav kompenzacije korisnika za uslugu prisustvovanja u odgovoru potrošnje. Rezultat uvođenja ove mjere je smanjenje razlike između vršnog i minimalnog opterećenja za 18,47 %.



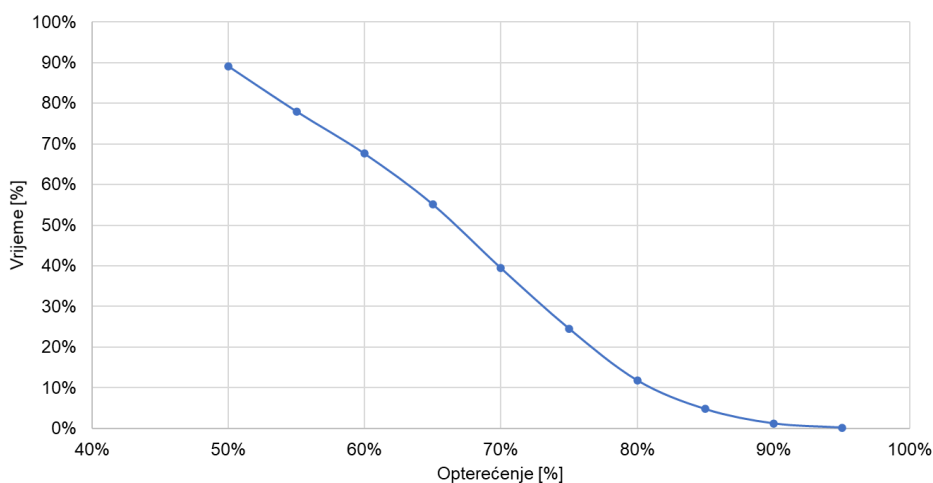
Krivulja trajanja opterećenja za provinciju Jiangsu, Kina, 2015.

Slika 21. Kratkoročnost visokih opterećenja [44]

Do sličnih se podataka dolazi i za elektro-energetski sustav Republike Hrvatske gdje se u manje od 1,5 % vremena postižu vrijednosti opterećenja više od 90 % maksimalne vrijednosti (Slika 22. i Slika 23.)

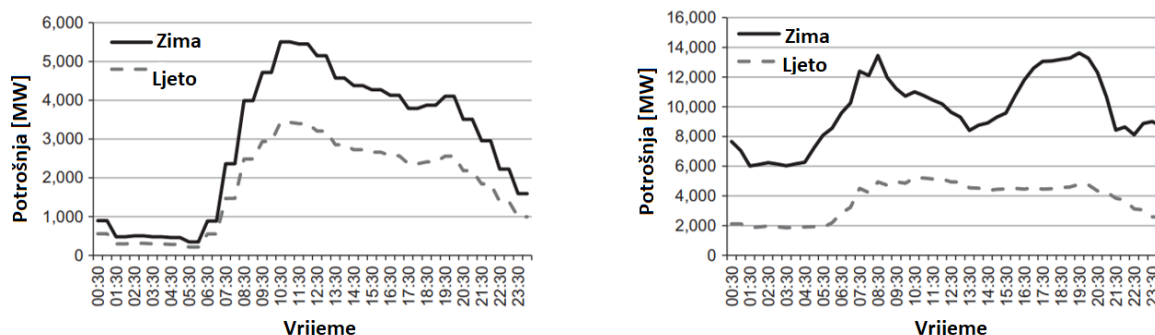


Slika 22. Krivulja trajanja opterećenja [45]

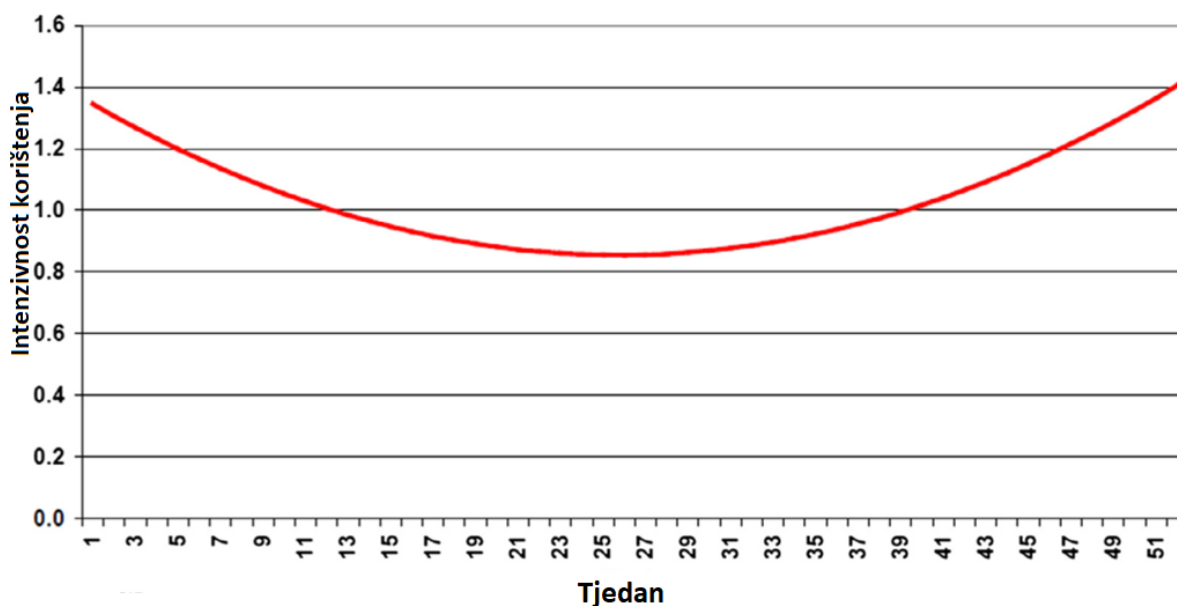


Slika 23. Odnos maksimalnog opterećenja i vremena [45]

Drysdale et al. [46] istražuju primjenjivost odgovora potrošnje s obzirom na senzualnost na primjeru Ujedinjenog Kraljevstva. Slika 24. i Slika 25. prikazuju razliku između tipične zimske i ljetne dnevne distribucije opterećenja potrebnog za pogon perilica rublja, posuđa i sušilica rublja. Također, prikazuje se i netom uzrokovana razlika u dostupnom odgovoru opterećenja s većim iznosom dostupnim tokom zimskog perioda.

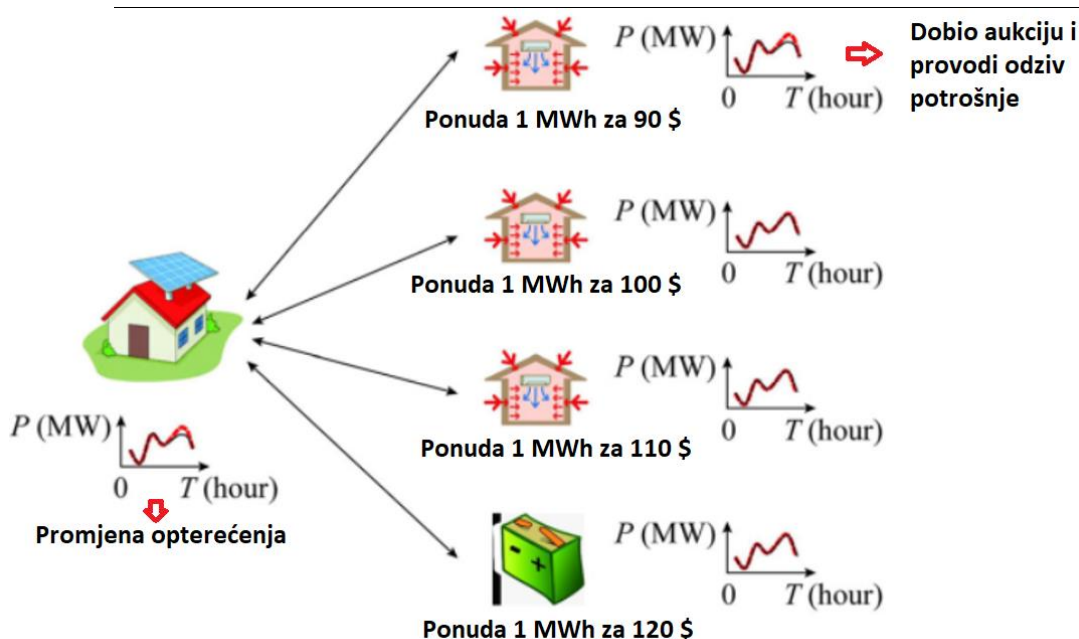


Slika 24. Utjecaj senzualnosti opterećenja (lijevo) na dostupnost odgovora potrošnje (desno)[46]



Slika 25. Distribucija relativnog opterećenja uređaja za pranje i sušenje [46]

Chen et al. [47] Predstavlja mogući problem kojim se mogu susresti pametna kućanstva i njihovi korisnici. Smatra da uslijed velikog broja pametnih kućanstva ne može doći do dovoljno velikih cijena električne energije uz dovoljno veliku potražnju za balansiranjem da bi postojala velika inicijativa stanovnika da sudjeluju u programima odgovora potrošnje. Kao odgovor na navedeni problem predstavlja model naplata usluga odgovora potrošnje koji se bazira na aukciji (Slika 26). Ideja je podijeliti električni sustav na više dijelova te na svakom od dijelovih provoditi aukcije. Uslijed nesrazmjera potrošnje i proizvodnje svako pametno kućanstvo ponudi određeni iznos za koji je spremno odraditi odgovor potrošnje te kao odgovor, operator električnog sustava najpovoljnijoj ponudi dodjeljuje uslugu odgovora potrošnje. Time se dolazi do veće financijske inicijative za sudjelovanjem u tržištu usluga odgovora potrošnje uz istovremeno izbjegavanje narušavanja ugodnosti ostalim kućanstvima. Kućanstva mogu pružati odgovor potrošnje u iznosu od 0,8 do 1,5 kW, dok poslovni objekti mogu pružiti od 2 do 4 kW.



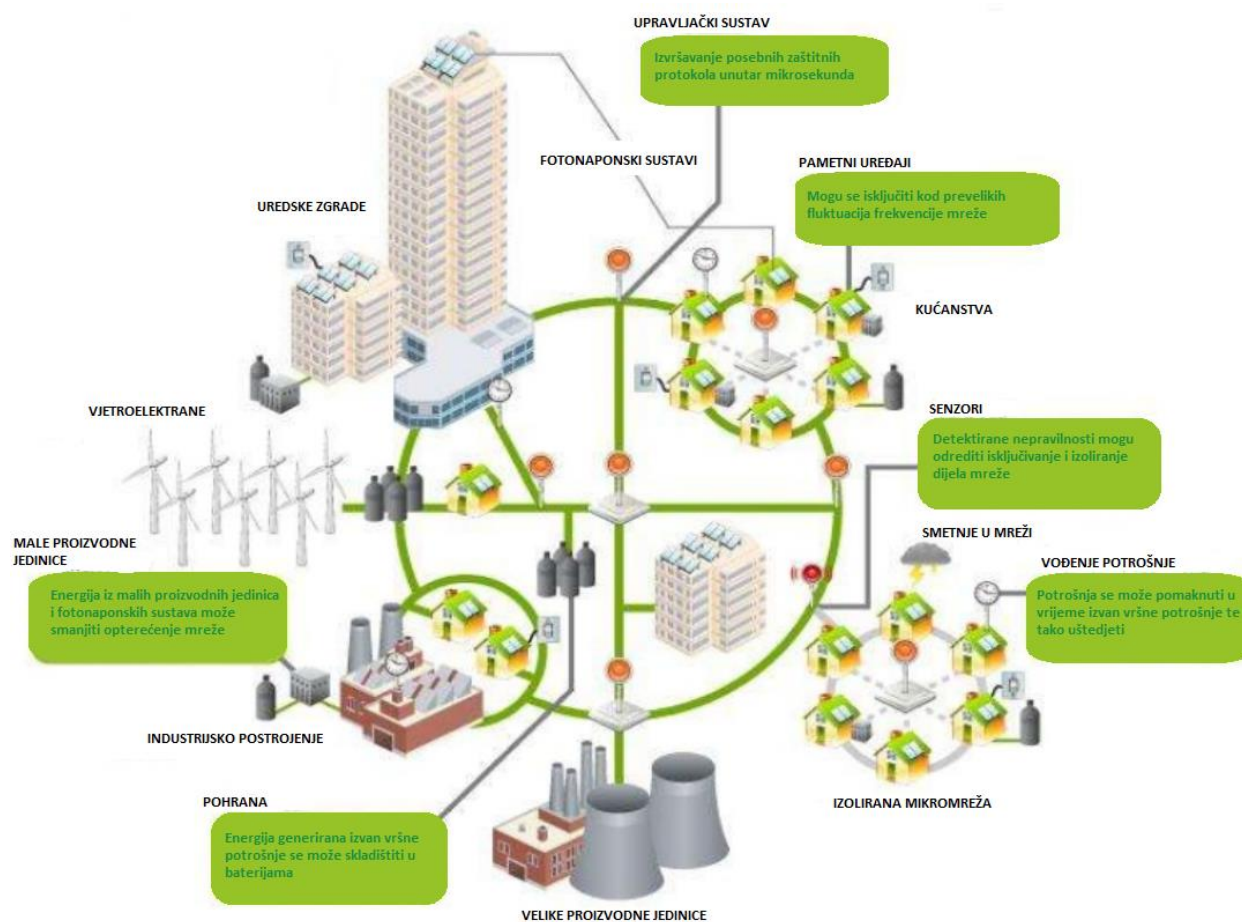
Slika 26. Sudjelovanje pametnih kućanstva na tržištu električne energije [47]

3.14. Sustavi grijanja, hlađenja i ventilacije u stambenim objektima

Najperspektivnije primjene za vršni odgovor potrošnje mogu se pronaći upravo u upravljanju sustavima grijanja, hlađenja i klimatizacije u većim stambenim objektima. Odgovor potrošnje s odgodom potrošnje je komercijalno primjenjiv samo u ovoj primjeni. Primjena može biti povezana s dizalicama topline kao izvorom energije za grijanje i hlađenje. Upravljanje takvim sustavima se proučava u [48], koristeći umjetnu neuronsku mrežu da bi se sustav grijanja i hlađenja „učio“ odgovarati na informaciju o cijeni električne energije i prilagođavati svoj učin vanjskim parametrima. Cilj takve metode je postići ekonomski optimalan rad sustava u stambenoj zgradi, čime se, uz pružanje odgovora potrošnje, postižu uštede za samu zgradu.

4. Pametna mreža i sudjelovanje zgrade u pametnoj mreži

U ovom poglavlju govori se pobliže o konceptima pametne mreže i sudjelovanju zgrada u njima. Pametna mreža predstavlja skup tehnologija koje omogućavaju bolju integraciju VOIE u elektroenergetski sustav. Model pametne mreže je dvosmjernan, dolazi do razmjene električne energije, ali i informacija od strane potrošača prema mreži tj. proizvođačima i obratno. Također, pametna mreža olakšava razvoj novih usluga kao što pametno punjenje elektrificiranog cestovnog prometa. Slika 27. prikazuje viziju kako bi pametna mreža bila integrirana u sustav. Obuhvaćala bi generatore, potrošače i sustav distribucije u cilju održive, sigurne i ekonomične električne energije.



Slika 27 Vizija pametne mreže

Od velike važnosti je prikupljanje informacija o zgradi tj. podataka o energiji koja se troši. U tome pomažu pametna brojila (engl. „Smart meter“) koji je prikazan Slika 28. Pametno brojilo bilježi potrošnju električne energije, plina ili vode kao i konvencionalna brojila, ali u stvarnom vremenu što nudi uvid u dnevnu, satnu ili minutnu potrošnju. Prikaz podataka se uglavnom ostvaruje putem zaslona koji su postavljeni u stambenim ili uredskim prostorima. Putem zaslona moguće je upravljati potrošnjom energije (zadavanjem željene potrošnje energije ili novca u jednome danu) za vrijeme boravka ili odsustva što se značajno može odraziti na potrošnju energije. Pametna brojila nude i razne oblike plaćanje potrošene energije putem interneta i mobilnih aplikacija.



Slika 28 Pametno brojilo

U novim zgrada raste trend instalacije pametnih, a ujedno raste i nadogradnja starih novim pametnim mjernim uređajima koji nude mogućnost i jednostavnost prikupljanja podataka u sustav automatizacije, jer ako podaci nisu dostupni nema koristi od veze sa pametnom mrežom kada nema razmjene podataka. Kada su preduvjeti za sudjelovanje zgrade ostvareni, zgrada može na nekoliko načina sudjelovati na pametnim mrežama:

- optimizacija rada sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije s ciljem najveće uštede novca
- sudjelovanje na tržištu energije uravnoteženja nudeći odgovor potrošnje „s pomakom“.
- sudjelovanje na tržištu energije regulacijom frekvencije mreže (*engl. frequency regulation*)

Zgrada svojim sudjelovanjem na mreži ima mogućnost odabira kako želi sudjelovati na tržištu energije, ovisno instaliranoj opremi. Glavna prednost je ušteda ili zarada novca, a na razini sustava ujedno stabilnija i otpornija mreža.

Zgrada na osnovu željene mikroklimе i uvidom u stvarnu cijenu može provoditi optimizaciju potrošnje s ciljem najveće uštede novca. Rješenja gdje se u optimizaciji koriste umjetna inteligencija i strojno učenje koji rade na principu crne kutije (*engl. Black box*). Crna kutija je uređaj, sustav ili objekt koji se može promatrati u smislu ulaznih i izlaznih podataka, bez ikakvog poznavanja unutarnjeg djelovanja, što je vidljivo iz prikaza (Slika 29). U crnu kutiju se unese podatke koji se pomoću softwera bez fizikalnog značenja analiziraju te kao rezultat na izlazu isporučuje se fizikalan i logičan odaziv (primjer također u [48]).



Slika 29 Prikaz Black box modela

Radne karakteristike današnjih uređaja ovise o raznim faktorima te se jednostavnim mjerama dolazi do ušteda novca i bez sudjelovanja na pametnoj mreži. Primjerice ako se razmotri promjena radne karakteristika dizalice topline voda-zrak ovisno o vanjskim temperaturnim uvjetima dolazi se do zaključka s ciljem uštede. Slika 30 prikazuje rashladni učin kompresora jedne dizalice topline ovisno o temperaturi kondenzacije (uz promjenu faktora hlađenja). Pri temperaturi kondenzacije od 30°C faktor hlađenja je 3,6 dok pri temperaturi od 50 °C je 2,2. U

ovome slučaju čak i da je konstantna cijena električne energije tijekom dana, može se optimizirati potrošnja ako dizalica topline radi noću.

Temp. kondenzacije	RASHLADNI UČINAK KOMPRESORA, $\Phi_{\text{komp}} = \Phi_{\text{isp}}$ EL. SNAGA KOMPRESORA, P_{komp}							
		Temperatura isparavanja						
		10 °C	5 °C	0 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C
30 °C	Φ, W	6060	5010	4100	3320	2650	2080	1600
	P, W	990	980	960	920	880	830	760
40 °C	Φ, W	5400	4450	3630	2930	2320	1810	1370
	P, W	1190	1150	1110	1050	980	900	810
50 °C	Φ, W	4760	3910	3180	2550	2010	1540	1150
	P, W	1380	1320	1240	1160	1060	950	840

Slika 30 Rashladni učinak kompresora za temperaturu isparavanja i kondenzacije

Zgrada može pružiti odgovor potrošnje s pomakom opterećenja tako da u potrebnim vremenskim periodima poveća, odnosno smanji potrošnju energije koju koristi za rad GViK sustava (npr. predhlađivanje ili predgrijavanje zgrade), ali tako da se ne naruši kvaliteta toplinske ugodnosti korisnika zgrade.

5. Osvrt na mrežne kodove za tehnologije odgovora potrošnje u EU

U rujnu 2020. je GB SO najavio uspješno pokretanje programskog sučelja širokog pristupa (API). Cilj tog projekta je ukloniti prepreke ulasku na tržište novih dionika, olakšavajući konkurenciju i pružajući isplative opcije. API je isplativo rješenje za manje pružatelje usluga, kao alternativa tradicionalnim fiksnim linijama za elektronički prijenos podataka te slanje i bilježenje. Omogućuje povezivanje novih tehnologija, kao što su obnovljivi izvori energije i baterija, kao i tradicionalnih tehnologija s tržištem energije uravnoteženja.

U listopadu UK Power Networks, ODS koji djeluje na jugoistoku Engleske, pokrenuo je projekt pod nazivom „Potencijal snage“ kako bi malim generatorima omogućio pružanje usluga kontrole napona OPS. Ovaj je projekt prvi na svijetu i mogao bi uštedjeti preko 400 milijuna funti do 2050 energetske potrošačima. Također bi mogao generirati dodatnih 4 GW u regiji. Ako se usredotočimo se na male proizvođače i pružatelje usluge uravnoteženja (<1MW), u ovom području razmatramo dva ključna pitanja:

- Je li izravni pristup uslugama OPS-a održiv za te kupce? Koji se posebni izazovi dalje postavljaju u tom smjeru?
- Ima li izravna integracija malih potrošača i pružatelja usluge uravnoteženja ekonomski smisao ili je poželjno agregirati prije nabave usluga?

Distribuirane izvore (DER) i pružatelji usluge male veličine definiramo kao proizvodne, potrošne ili skladišne kapacitete snage <1MW, povezane na distribucijsku mrežu. Potencijal fleksibilnosti koji nudi ova skupina kupaca trenutno se uglavnom odnosi na smanjenje potrošnje (dakle redukcijski odgovor potrošnje) ili preusmjeravanje opterećenja (dakle, odgovor potrošnje „s pomakom“, što samo po sebi donosi složenost u većini slučajeva tehnologija pretvorbe energije, npr. dizalice topline s toplinskim spremnikom, električni uređaji itd.), Ali sve će više uključivati potencijalne usluge povezane sa skladištenjem energije u baterije EV-a i kućne baterije.

Tehnologija će igrati ključnu ulogu u rastu ovih mogućnosti jer otključava sposobnost razvoja standardiziranih, automatiziranih usluga. Važno pitanje u razmatranju je li moguća izravna suradnja OPS-a / potrošača jest koju bi ulogu OPS-a imao u takvom aranžmanu. Suradnja OPS-a / ODS-a bitna je kako bi se osiguralo da se nabave pravi proizvodi u pravom iznosu za rješavanje problema na razini distribucije koji bi inače zahtijevali ulaganje. Da bi podržao ovu suradnju, plan razvoja mreže koji će ODS-ovi izraditi svake dvije godine, trebao bi uključivati upotrebu odgovora potrošnje, energetske učinkovitost, spremnike energije i druge resurse.

Tehnički zahtjevi koje je potrebno implementirati za novi DER ili krajnje korisnike fleksibilnosti (potrošači, korisnici spremni na odgovor potrošnje koji koriste pametne mreže, IoT ili blockchain tehnologije u komunikaciji s mrežom) mogu se razlikovati ovisno o vremenu njihove prijave na sheme pružanja fleksibilnosti. Mogu se razlikovati dvije vrste korisnika:

- 1) Krajnji korisnik koji se prijavi za shemu u trenutku stjecanja opreme potrebne da bi postao kupac s vlastitom proizvodnjom / pružatelj usluga fleksibilnosti:
 - kroz agregatore (standardizirane sheme),
 - samostalno (izravna komunikacija s OPS-om i / ili ODS-om - mora osigurati tehničko rješenje koje će se primijeniti za komunikaciju i pružanje fleksibilnosti).
- 2) Krajnji korisnik koji se prijavi kasnije (već sudjeluje kao DER, kupac s vlastitom proizvodnjom itd.) - treba slijediti djelomični postupak koji se sastoji samo od komponenata koje su prethodno nedostajale.

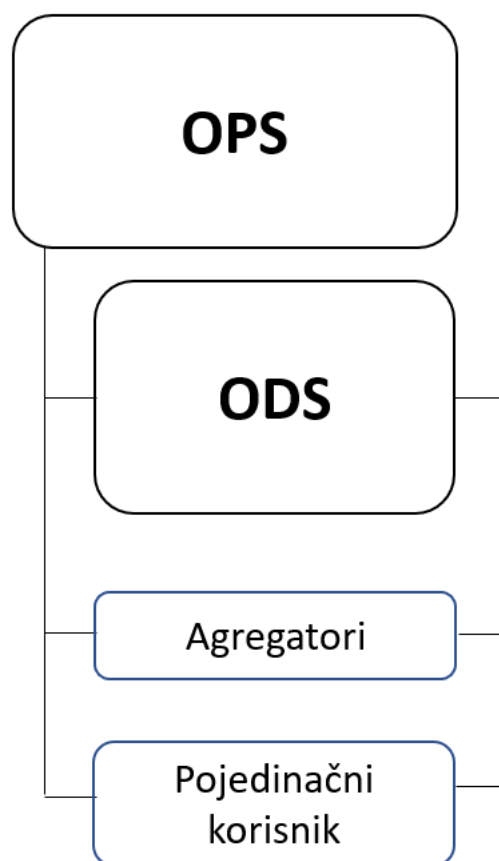
Potrebno je izraditi određene propise kako bi se osigurala nabava putem tržišno utemeljenih mehanizama i temeljila se na nediskriminatornom sudjelovanju svih vrsta resursa. Trenutno mrežni kodovi ne obuhvaćaju DER male veličine i morat će se proširiti uzimajući u obzir bitne dijelove dobro funkcionirajućeg tržišta sa slobodnom konkurencijom:

- Potpune informacije;
- Racionalni sudionici;
- standardizirani proizvodi;
- likvidnost;
- Niski troškovi ulaska i izlaska; i
- Niski transakcijski troškovi.

Potrebne su različite mogućnosti implementacije za DER i pružatelje fleksibilnosti. Glavne međuovisnosti prikazane su na slici.

Za svaku ovisnost procjenjuju se složenost postupaka potrebnih za omogućavanje interakcije visoka, srednja ili niska:

- Pojedinačni korisnici s OPS i ODS - visoka. Raznolikost tehnologija i mogućnosti čine ovo složenom interakcijom za definiranje i opisivanje. To je prepreka koju treba prevladati kako bi izravna integracija imala ekonomski smisao nasuprot agregaciji. Prepreka bi se mogla pretvoriti u novo tržište s mogućnošću pružanja softvera (i sigurnog hardvera) za takvu interakciju.
- OPS do ODS - srednja. Već je u tijeku rad na mrežnim kodovima i razvoju propisa kako bi se riješila ta interakcija.
- Agregatori s OPS / ODS - niska. Standardni proizvodi već su uspostavljeni između tih strana i mogu se lako dalje razvijati.
- Pojedinačni korisnici s agregatore - niska. Aranžmani za proizvode kao što su odgovor potrošnje i prebacivanje opterećenja već su u komercijalnom pogonu. Razmatra se i međusobna razmjena.



Slika 31 Međuodnosi sudionika u trgovanju uslugama uravnoteženja

U slučaju pojedinačne interakcije s OPS-om i ODS-om, standardizirani proizvodi važan su put za uspostavljanje interakcije između sudionika. Prioritet treba dati definiranju novih proizvoda ili proširenju postojećih proizvoda koji su održivi za izravnu interakciju između manjih jedinica i OPS-a.

Kako bi se omogućilo funkcioniranje svih bitnih dijelova dobro funkcionirajućeg tržišta sa slobodnim tržišnim natjecanjem, moraju se postaviti minimalni tehnički zahtjevi za sve tipične slučajeve interakcije između kolega i OPS-a / ODS-a. Agregatore je možda lakše regulirati i

rukovati njima, ali također se mora poštivati i definirati individualni pristup tako da ne predstavlja opterećenje (po izboru potrošača), već umjesto toga mora biti u mogućnosti učiti na ovo tržište u usponu pod jednakim osnovama i natjecati se u tehničkim i ekonomskim aspektima. Ovaj je korak presudan jer osim regulatornih zahtjeva, predstavlja i izazov u tehničkoj provedbi (nove vještine za radnu snagu). Mrežni kodovi trenutno ne prihvaćaju ovu interakciju i to će morati biti fokus za razvoj.

Izravno sudjelovanje krajnjih korisnika je moguće, ali postoje izazovi za integriranje DER-a malog opsega na razini distribucije; kako definirati standardne proizvode, kako odrediti pravu razinu tih proizvoda za nadoknađivanje ulaganja, **uspostavljanje postupaka za interakciju** i kako opisati tu interakciju u mrežnim kodovima.

Mrežni kodovi i smjernice trebali bi biti **značajno prošireni i poboljšani** kako bi se dalje omogućilo aktivno sudjelovanje malog DER-a u izravnom pružanju usluga OPS-a.

Uloga budućeg ODS-a u pogledu malog DER-a presudna je u određivanju koji su resursi i ograničenja mjerodavni na lokalnom nivou, kako bi se obavijestio OPS koje usluge treba naručiti. Također, ODS-ovi trebaju implementirati **set minimalnih tehničkih zahtjeva** za nove tipove korisnika i osigurati pravodobno osiguravanje priključka na mrežu nakon što se ti zahtjevi ispune. Pritom će ODS omogućiti uključivanje korisničke interakcije bez barijera i formirati tržište fleksibilnosti / uravnoteženja s jednakim osnovama za agregatore i pojedinačne sudionike.

6. Nova tehnološka rješenja za krajnje korisnike

6.1. Osnove blockchain tehnologije

Blockchain (BC) predstavlja digitalnu strukturiranu bazu podataka transakcija koja se sastoji od više međusobno jednoznačno povezanih blokova informacija koji tvore lanac (*engl. „chain“*). Tako definirana tehnologija predstavlja transparentnu platformu za donošenje odluka i njihovo zapisivanje. Hash je digitalni potpis dobiven izvođenjem algoritma koji kao rezultat daje numeričku vrijednost fiksne duljine [49] i time osigurava jednoznačnost zapisane transakcije ili odluke. Također, kriptografska zaštita hasha osigurava privatnost podataka. Pošiljatelj šifrira (kodira) podatke te ih pošalje primatelju, koji uz pomoć ključa dešifrira šifru te čita podatke. Algoritmi koji stvaraju hasheve temelje se na bitovima. Njihova je zadaća stvoriti jedinstveni hash kod koji će se moći koristiti u transakcijama.

Svaki blok se sastoji od informacije o transakciji te od kriptografske informacije koje povezuju prethodnu kariku lanca s trenutnom. Te informacije su složene pomoću hash algoritma te je nemoguće nekom okom vidljivom logikom povezati kriptirane šifre. Svaka je šifra iste duljine te osim što je jednoznačna jest i jednokratna jer ako se promijeni neka informacija u bloku ona postaje nepravovaljana te se cijeli lanac prekida. BC se sastoji od dvije osnovne skupine sudionika, to su čvorovi (*engl. „validators“*) čija je zadaća odobravati transakcije te korisnika Korisnikom može postati bilo tko s pristupom mreži s time da postoje razredi privatnosti. Tako [50] definira javne, privatne i javnoprivatne te dopuštene BC s odobrenim konsenzusom i nedopuštene BC s neodobrenim konsenzusom. Potreban trud i zalaganje k zajedničkom cilju odnosno upravljanje zajedničkom decentraliziranom digitalnom knjigom (*engl. „ledger“*) transakcija ostvareno je tzv. teorijama igara gdje se teži postizanju određenog stanja ravnoteže u kojem su svi korisnici zadovoljeni i ne smiju djelovati zasebno na svoju ruku te u ostvarivanju samo svojih ciljeva [50]. S druge pak strane privatni s potrebnom dozvolom BC zahtijevaju višu razinu privatnosti te se odnos među sudionicima temelji više na privatno-poslovnom odnosu. U ovakvim odnosima nema nikakve potrebe za „umjetnim“ igrama te posljedično tome ovako posložene digitalne knjige su brže, fleksibilnije i učinkovitije.

6.2. Blockchain u energetske sektoru

BC predstavlja savršenu platformu za implementaciju svih težnji EU za djelovanjem u području zaštite klime, energetske sigurnosti, OIE te implementacije rješenja za njihove probleme varijabilnosti. Jedan od ciljeva koje si je EU zadala jest i pomoći u osiguravanju pravedne i uključive tranzicije što se zasigurno iz postavki BC-a može postići [51]. Njemačka energetska agencija (DENA) tvrdi da BC tehnologija ima potencijal poboljšati korisnost trenutnih energetske procesa i praksi, ubrzati razvoj platformi Interneta stvari (IoT - *engl. „Internet of things“*) te digitalizirati sve operacije koje su za to prigodne [53]. Kao i obično s digitalizacijom te prelaskom na nove tehnologije kod ljudi se javlja određena skepsa i nepovjerenje prema istome. Tako u istraživanju koje je provela DENA čak 2/3 ispitanika, među kojima su distributeri, operateri, proizvođači te ostali dionici na tržištu električne energije, kaže da se boji prelaska na BC u poslovanju. S druge pak strane, 13 % njih već ima BC u nekom od svojih poslovanja, 39 % ih ima u planu dok preostalih 48 % uopće ne razmišlja o tome. Velika većina ispitanika smatra kako je vrlo izvjesno širenje BC-a, 21 % smatra da će biti ključan igrač u promjeni paradigmi, 14 % vidi tek rubne primjene, a 5 % vjeruje da će uloga BC-a (p)ostati minorna. Neki autori smatraju kako je ovo prava prilika za krajnje korisnike i potrošače koji bi mogli ovim načinom međusobno trgovati svojim viškovima bez dodatnih naknada [54]. Ono

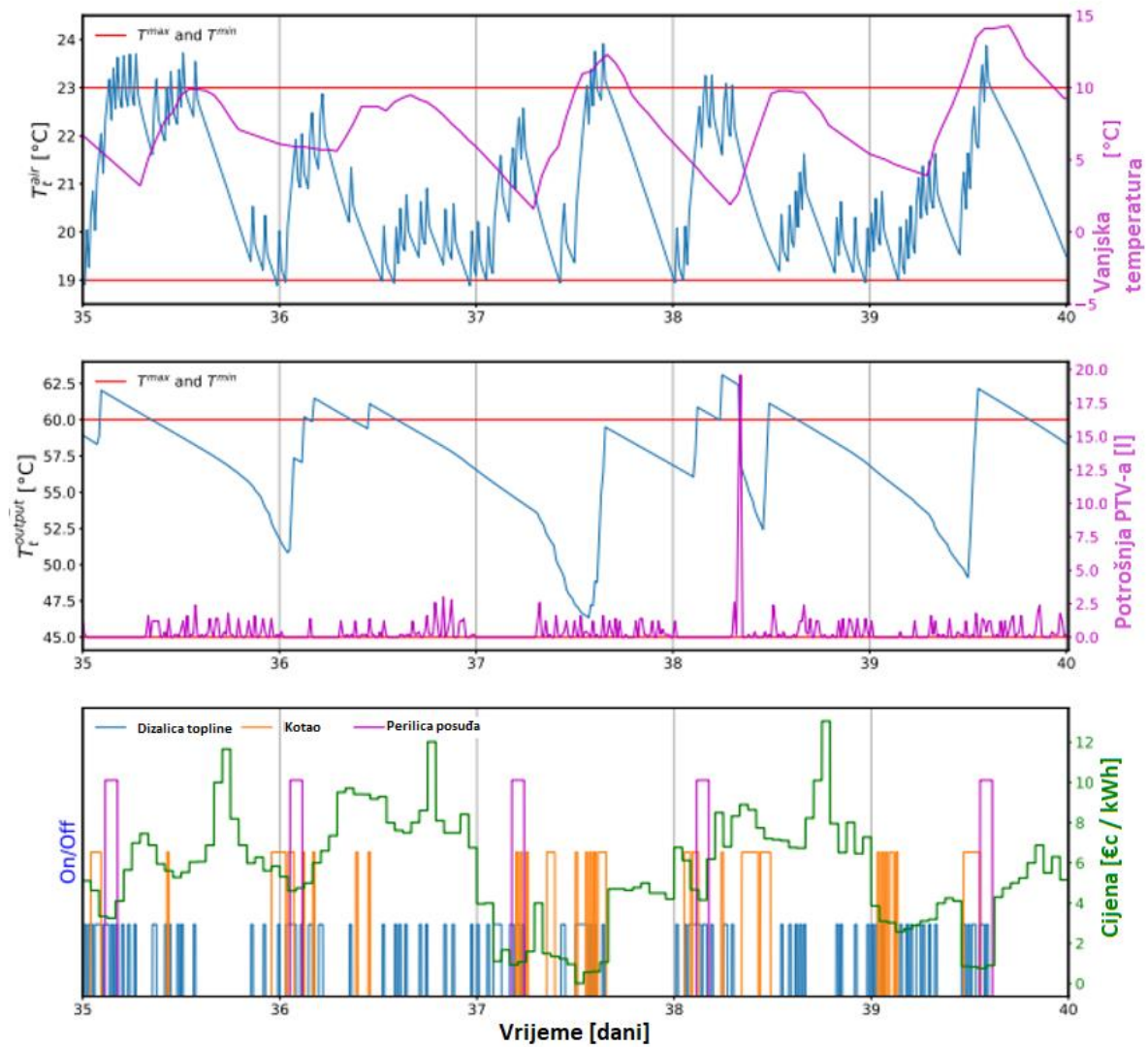
što ovakva tehnologija donosi je prilika da se optimizacijom energetske procesa smanje troškovi, poboljšanjem kriterija cyber sigurnosti poveća generalna sigurnost u smislu zaštite podataka i sigurnosti opskrbe energijom te se na kraju riješi problem integracije VOIE odnosno decentraliziranih izvora energije. Automatizacija i regulacija decentraliziranih izvora, upravljanje mrežom, sigurnost i privatnost podataka, dijeljenje resursa, kompetitivnost te transparentnost samo su neke od dobrih karakteristika koje BC može poboljšati ili dovesti do optimuma u poslovanju energetske tvrtke i sudjelovanju na tržištu energijom.

6.3. Blockchain u elektrificiranom prometu

Europski zeleni plan kao jedan od svojih ciljeva donosi i dekarbonizaciju sektora prometa. Među inima se navodi da bi se postigla klimatska neutralnost, potrebno je do 2050. godine smanjiti emisiju u prometu za 90 %, tako da će Komisija usvojiti strategiju za održivu i pametnu mobilnost u svrhu rješavanja ovog izazova i rješavanja svih izvora emisije. Po svojoj prirodi električna vozila su pogodna za primjenu BC-a. Naime, i električna vozila kao i BC su decentralizirani s puno sudionika u obliku vozila, vozača, punionica, putnika te korisnika raznoraznih usluga kao što su Uber i sl. Kao glavna prednost u ovoj primjeni BC-a ističe se dokidanje potrebe za nekom nadređenom jedinicom koja upravlja punionicama, dokidanje grešaka u sustavima te potencijalni dogovor vlasnika punionica oko cijene punjenja. Osim potencijalno nižih cijena, korisnicima punionica se omogućuje transparentan uvid u sve transakcije na toj punionici te time mogu odabrati onu najpoželjniju svojim potrebama ili čak vidjeti koja je, koliko i kad zauzeta. Predvodnici u implementaciji BC-a u sektoru elektrificiranog prometa su Nijemci, koji su sa svojom platformom Share&Charge pokrenutom 2017. uspjeli spojiti interese privatnih punionica te vlasnika električnih vozila. Punionica koristi javni BC servis Ethereum i pametne ugovore. Korisnici imaju pametne ključeve kao pristup informaciji o cijeni te ostalim uslugama, a platforma sama nakon prestanka korištenja naplaćuje uslugu. Izazovi koji stoje pred ovakvom implementacijom su svakako privatnost, sigurnost samih automobila koja slijedi iz prethodnog problema te razvijanje infrastrukture mreže na koju će se priključivati električna vozila.

6.4. Korištenje strojnog učenja

Strojno učenje je grana umjetne inteligencije koja se bavi oblikovanjem prethodno nepoznatih algoritama koji povezuju računalu predstavljene ulazne podatke te željeni ishod. Time se dolazi do algoritama potrebnih za rješavanje određenog problema bez potrebe za eksplicitnim programiranjem. Radi na principu obrade velikog broja podataka te se točnost povećava uz što veću dostupnu bazu podataka. Primjena u energetskoj industriji se svodi na prepoznavanje uzoraka kretanja cijena električne energije, povezivanje s vanjskim faktorima kao vremenske prilike te na temelju toga određivanje kretanja u budućnosti koje može poslužiti za predviđanje rada određene opreme. Slika 32. prikazuje primjenu strojnog učenja na primjeru dizalice topline i električnog PTV kotla. Na temelju prijašnjih uzoraka ponašanja i dan unaprijed cijena električne energije, algoritam određuje rad sustava kako bi minimizirao troškove i izbjegao rad za vrijeme visoke cijene električne energije [52].

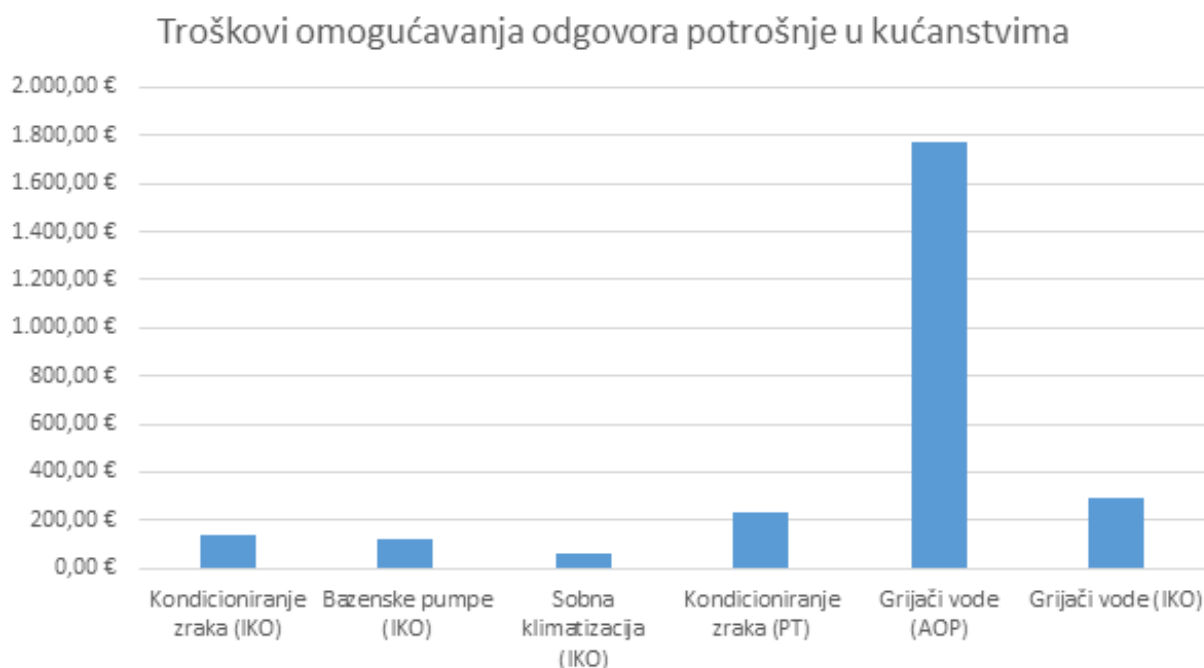


Slika 32. Primjena strojnog učenja na primjeru dizalice topline i kotla PTV-a [52]

7. Procjene troškova komponenti za omogućavanje tehnologija odgovora potrošnje

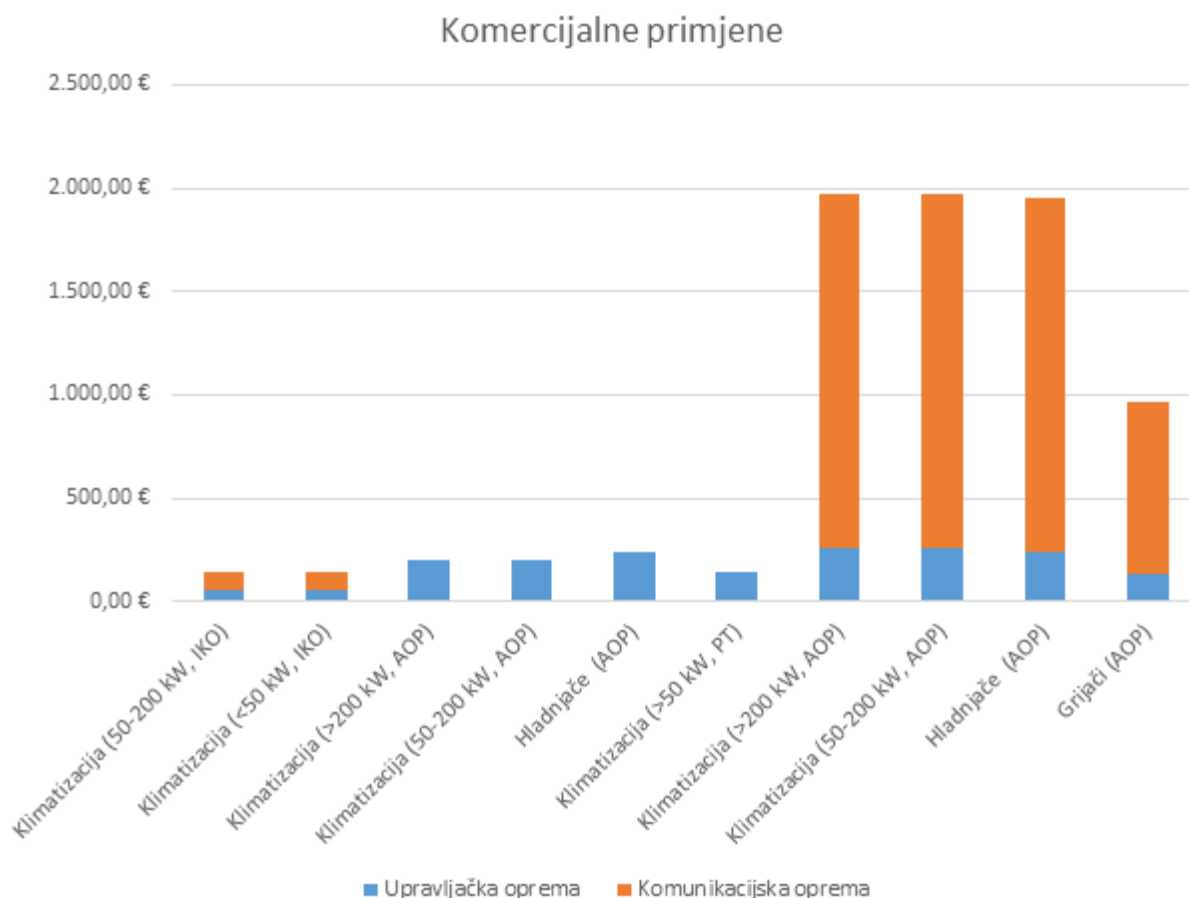
Tehnologije za omogućavanje odgovora potrošnje može se definirati kao mješavina hardvera i softvera za kontrolu opterećenja i komunikaciju, koji omogućuju promjenu uzoraka potrošnje energije krajnje upotrebe. Tehnologije omogućavanja takvog rada, definirane su na način koji pogoduje procjeni očekivanih troškova i učinka. Procjena troškova daje procjene početnih troškova za instalaciju, sučelje komunikacijskih resursa, telemetriju i upravljački hardver za tehnologiju koja omogućuje odgovor potrošnje, prema studiji potencijala Kalifornije za primjenu odgovora potrošnje do 2025.[2]. Pritom se način rada odgovora potrošnje dijeli prema definicijama u Tablica 1 i Slika 3.

U kućanstvima je moguće opremiti sustave za kondicioniranje zraka, pumpe, sobnu klimatizaciju i grijače vode odgovarajućim rješenjima izravne kontrole opterećenja, automatskog odgovora potrošnje ili pametnih termostata. Slika 33 prikazuje troškove ovih dodatnih zahvata u tipičnim procesima u kućanstvu.



Slika 33 Troškovi omogućavanja odgovora potrošnje u kućanstvima

U poslovnim zgradama postoji različita paleta opreme za klimatizaciju, hladnjača ili opreme za grijanje, koja se može opremiti za pružanje odgovora potrošnje. Pritom IKO klimatizacija može raditi u redukcijskoj vrsti odgovora potrošnje, AOP klimatizacija, hladnjače i manja klimatizacija s PT može raditi u redukcijском i odgovoru potrošnje „s pomakom“, a za AOP klimatizaciju koja pruža brzi odgovor potrošnje nužna je dodatna komunikacijska oprema. Slika 34 prikazuje troškove omogućavanja ovakvog odgovora potrošnje.

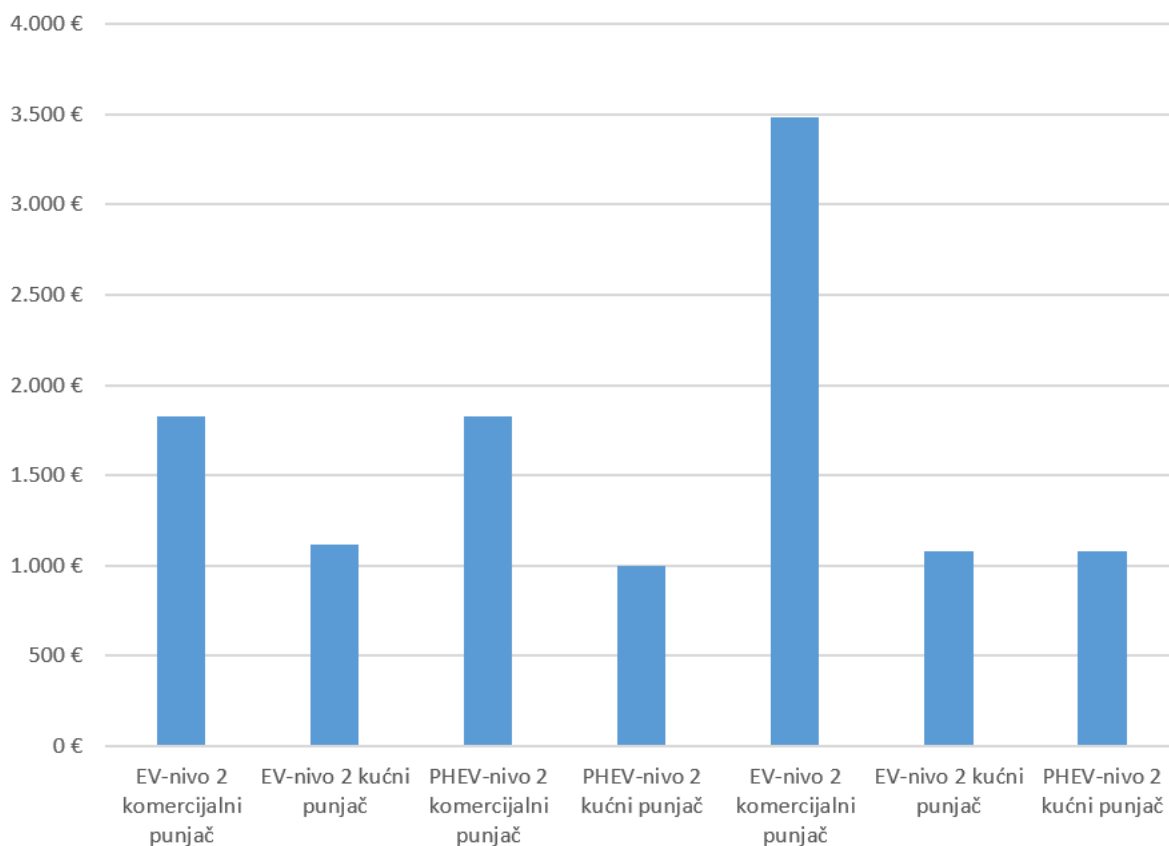


Slika 34 Troškovi omogućavanja odgovora potrošnje kod komercijalnih primjena

Kod električnih vozila, potrebno je samo ostvariti protok informacija s energetske tržišta i iz mreže te povratnu vezu o stanju napunjenosti baterije vozila, kako bi se stvorili uvjeti za sudjelovanje vozila priključenih na punjač u pružanju odgovora potrošnje.

Komercijalne i kućne jedinice za punjenje električnih vozila opremljene kontrolnim tehnologijama mogu omogućiti električnim vozilima da pruže fleksibilni odgovor potrošnje i pružaju usluge odgovora potrošnje „s pomakom“. Troškovi dijelova preuzeti su iz novijih projekata u SAD-u, na kojima se temeljila studija [2]. Troškovi se mogu revidirati kroz diskusiju s lokalnim dionicima procesa (Hrvatska Elektroprivreda). Prva četiri tipa punjača pružaju usluge redukcijanskog odgovora potrošnje i odgovora potrošnje „s pomakom“, dok zadnja tri pružaju usluge brzog odgovora potrošnje. Slika 35 prikazuje troškove omogućavanja odgovora potrošnje kod električnih vozila.

Cijene tehnologija za omogućavanje odgovora potrošnje kod električnih vozila

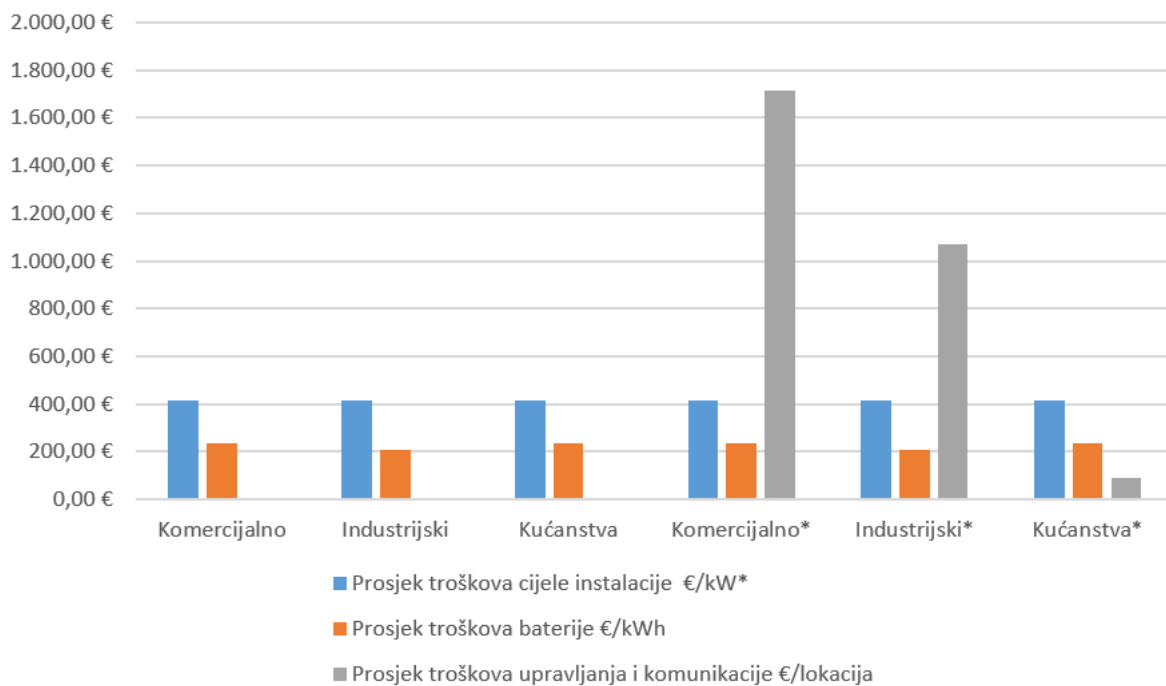


Slika 35 Troškovi omogućavanja odgovora potrošnje kod električnih vozila

Baterijske tehnologije koje su primarno namijenjene, primjerice, za skladištenje energije proizvedene od strane kupaca s vlastitom proizvodnjom, trebaju dodatnu opremu kako bi mogle sudjelovati u pružanju odgovora potrošnje.

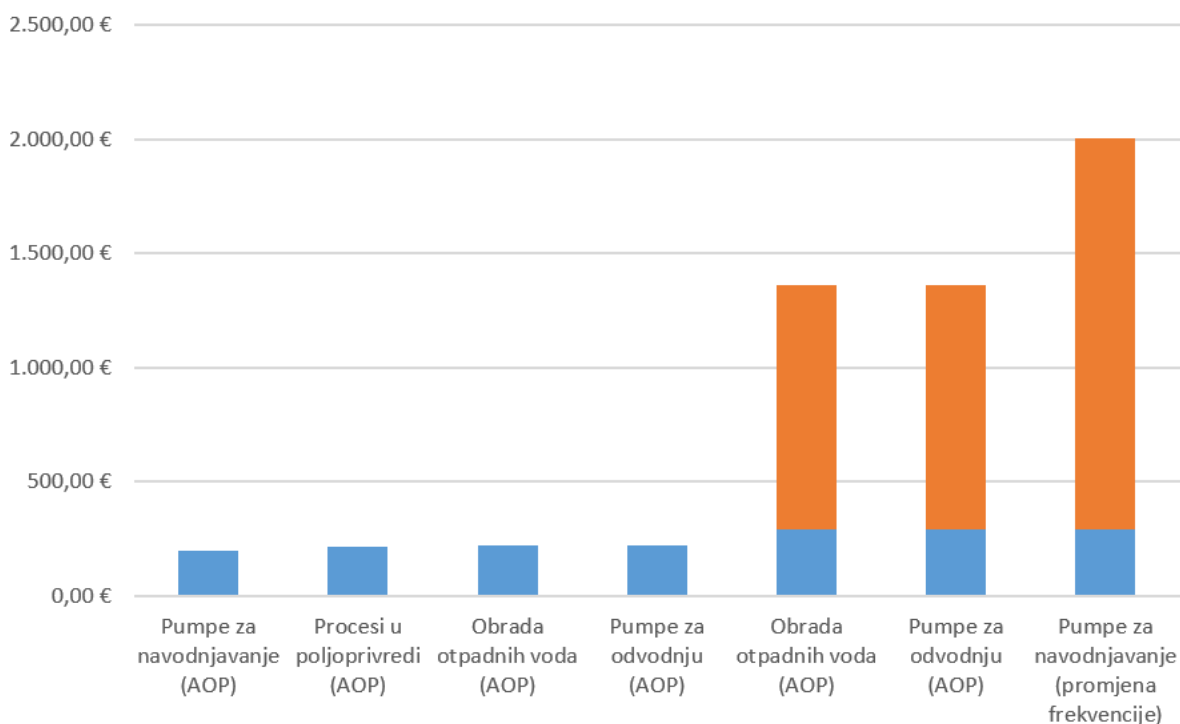
Troškovi cijele instalacije uključuju troškovi baterije u €/kWh te ostalih komponenti troškova u €/kW (inverter, povezivanje sa sustavom, sustav upravljanja punjenjem/pražnjenjem i instalacija). Prva tri slučaja se odnose na tehnologije koje pružaju usluge redukcijskog odgovora potrošnje i odgovora potrošnje „s pomakom“, dok zadnja tri (označena zvjezdicom*) pružaju usluge brzog odgovora potrošnje. Troškove prikazuje lika 36. Industrijske primjene baterijskih tehnologija i troškove omogućavanja odgovora potrošnje u tom slučaju donosi Slika 37.

Trošak omogućavanja baterijskih tehnologija



lika 36 Trošak omogućavanja odgovora potrošnje iz baterijskih tehnologija

Troškovi omogućavanja industrijskih tehnologija odgovora potrošnje

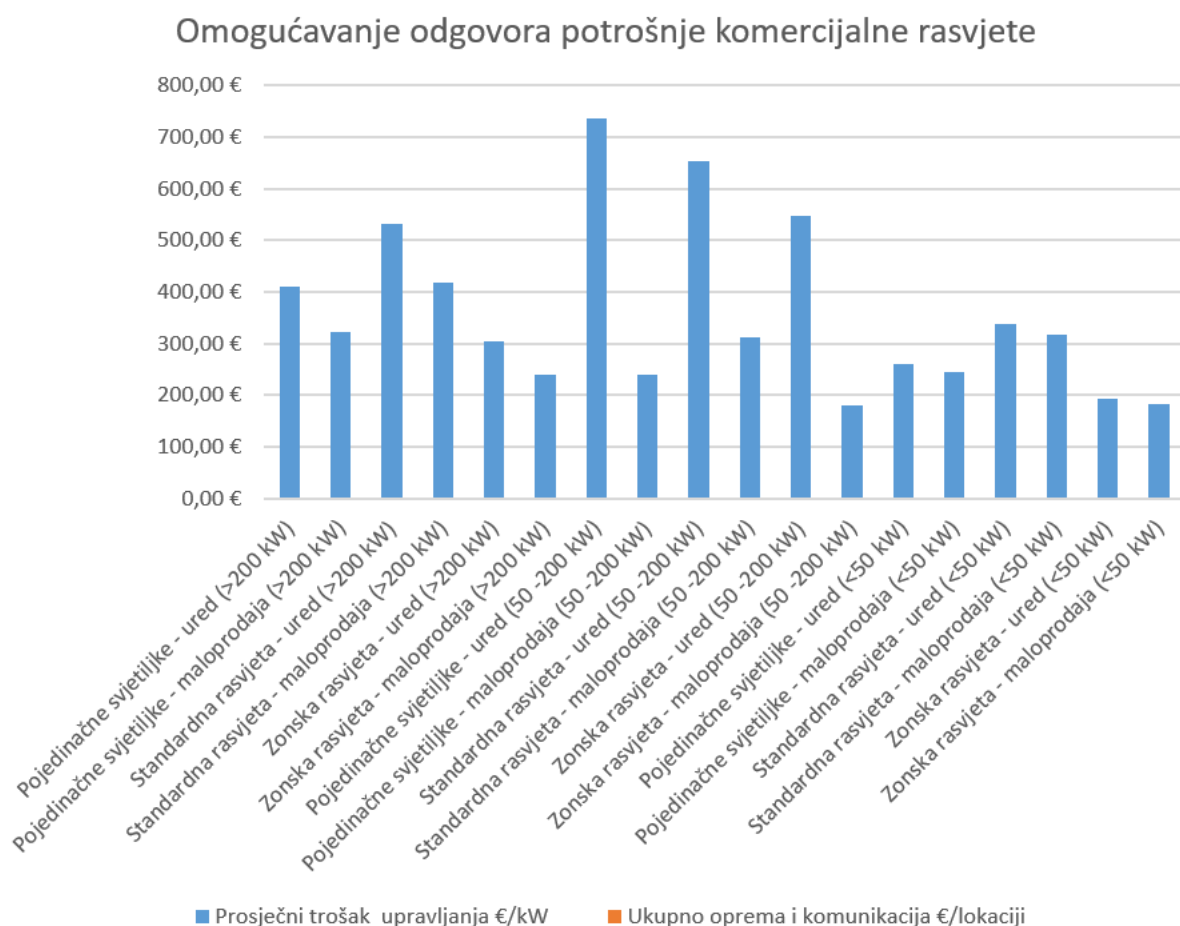


Slika 37 Troškovi omogućavanja odgovora potrošnje kod industrijskih tehnologija

Za redukcijski odgovor potrošnje može se koristiti rasvjeta, uz odgovarajuću dodatnu opremu. Razmatrana su tri slučaja upotrebe rasvjete, uz primjenu AOP:

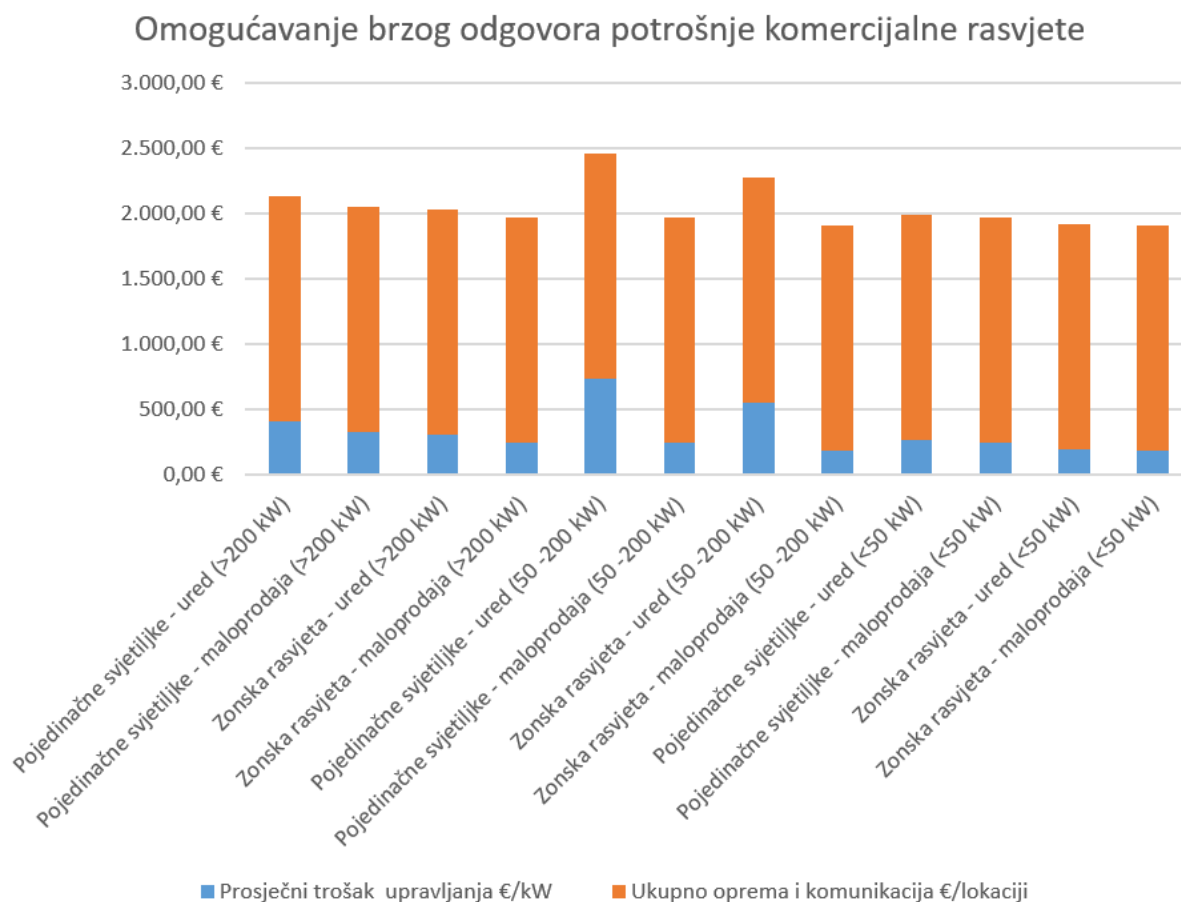
- Pojedinačna svjetiljka: visoko granulirana kontrola, uključujući digitalno adresirane pojedinačne svjetiljke;
- Zonska rasvjeta: zonsko kontrolirane svjetiljke;
- Standard: postojeći standardni sustav osvjetljenja za praksu koji je u skladu sa standardom CA 24 za energetska učinkovitost.

Uobičajeno je da se većina upravljačkih sklopova rasvjete prodaje kao cjeloviti sustav, uključujući upravljačke sklopove, a cjelokupni sustav kontrolira se pomoću sustava za upravljanje energijom ili sličnom platformom. Sustavi upravljanja rasvjetom i zonskim osvjetljenjem mogu pružati usluge redukcijskog i brzog odgovora potrošnje, ali kako bi pružili brzi odgovor, potrebno je uložiti u dodatnu komunikaciju i telemetriju. Ovisno o veličini zgrade ili područja, troškovi svjetiljke i zonskog sustava se razlikuju. Standardnim sustavima osvjetljenja nedostaje granularnost kontrole rasvjetnih tijela i zonskih sustava, ali mogu pružiti redukcijske usluge. Slika 38 prikazuje troškove kod komercijalne rasvjete.



Slika 38 Omogućavanje odgovora potrošnje kod komercijalne rasvjete

U slučaju potrebe da se rasvjeta koristi za brzi odgovor potrošnje, potrebna je veća količina dodatne opreme, kako bi se omogućila brza komunikacija s mrežom i tržištem. Slika 39 prikazuje dodatne troškove za različite tipove rasvjete.



Slika 39 Brzi odgovor potrošnje kod rasvjete

Druga perspektiva iz koje se može promatrati troškove je perspektiva potrošača u kućanstvima, koji je spreman pružiti uslugu odgovora potrošnje na štetu vlastite komocije. Tim pitanje se bavila studija [55]. Anketa među korisnicima u kućanstvima korištena je za procjenu spremnosti korisnika da prihvate određenu naknadu kada se usvoji prebacivanje električnog opterećenja. Za izračunavanje troškova odgovora potrošnje koriste se dvije različite metode: postotnu naknadu za raspoloživost odgovora potrošnje te metoda temeljena na makroekonomskom modelu, koji uzima u obzir faktor ovisnosti kupaca o opterećenju i satnici. Rezultati su pokazali da su troškovi odgovora potrošnje mnogo manji od troškova prekida opskrbe koje plaća opskrbljivač ili/i DSO, pa je stoga u najboljem interesu svih dionika, tj. kupaca, opskrbljivača i distributera da se uvede tehnologije odgovora potrošnje.

LITERATURA

- [1] European Green Deal, Available: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf,
- [2] Alstone, P., Potter, J., Piette, M.A., Schwartz, P., Berger, M.A., Dunn, L.N., Smith, S.J., Sohn, M.D., Aghajanzadeh, A., Stensson, S., Szinai, J., Walter, T., 2016. Final Report on Phase 2 Results - 2015 California Demand Response Potential Study: Charting California's Demand Response Future. Lawrence Berkeley National Laboratory
- [3] DOE, Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them, Tech. rep. Department of Energy Report to the US Congress, 2006.
- [4] Bertoldi P, Zancanella P, Boza-Kiss B.; Demand Response Status in EU Member States; EUR 27998 EN; doi:10.2790/962868
- [5] Cooney S., Utility Adds 2.5 MW Of Demand Response Capabilities With Very Unusual “Batteries”, 2019
- [6] EIA: International Energy Outlook 2019, U.S. Department of Energy, Washington, 2019
- [7] Mathieu J.L.: Modeling, Analysis, and Control of Response Resources, University of California, Berkeley, 2012
- [8] Krajačić, G., Duić, N., Mathiesen, B. & Carvalho, M. (2010) Smart Energy Storages for Integration of Renewables in 100% Independent Energy Systems. Chemical Engineering Transactions, 21, 391-396 doi:10.3303/CET1021066.
- [9] Pfeifer A., Krajačić G., Ljubas D., Duić N., Increasing the integration of solar photovoltaics in energy mix on the road to low emissions energy system – Economic and environmental implications, Renewable Energy, Volume 143, 2019
- [10] Dorotić, H., Doračić, B., Dobravec, V., Pukšec, T., Krajačić, G. & Duić, N. (2018) Integration of transport and energy sectors in island communities with 100% intermittent renewable energy sources. Renewable & sustainable energy reviews, 99, 109-124 doi:10.1016/j.rser.2018.09.033
- [11] Vržogić, L. (2019) 'Analiza integracije krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom električne i toplinske energije u postojeći energetska sustav', diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [12] N. Švarc, T. Robina, M. Špoljarić. Scenariji integracije OIE u strategiji en. razvoja RH, projekcije i učinci (Razvoj tržišta regulacijskih usluga - stanje i perspektiva. HEP Proizvodnja, Radionica EUKI SEEETD, FSB Zagreb, 31.01.2018.

- [13] Gils, H. C.; Assessment of the theoretical demand response potential in Europe, *Energy*, Volume 67, 2014, Pages 1-18, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.019>.
- [14] Bertsch, V.; Hall, M.; Weinhardt, C.; Fichtner, W.; *Energy*, 2016/11/01, 114, 465–477, Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany, 10.1016/j.energy.2016.08.022
- [15] Child, M.; Kemfert, C.; Bogdanov, D.; Breyer, C.; Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe, *Renewable Energy*, Volume 139, 2019, Pages 80-101, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.077>.
- [16] McKenna, E., Higginson, S., Grunewald, P. et al. Simulating residential demand response: Improving socio-technical assumptions in activity-based models of energy demand. *Energy Efficiency* 11, 1583–1597 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9525-4>
- [17] Christensen, T. H., Larsen, S. P. A. K., & Knudsen, H. N. (2019). How to engage households in energy demand response solutions? In *eceee 2019 Summer Study proceedings: Is efficient sufficient? European Council for an Energy Efficient Economy, ECEEE. ECEEE Summer Study*
- [18] Hargreaves, T. (2018): Beyond energy feedback. *Building Research & Information* 46(3): 332-342.
- [19] Hargreaves, T., Nye, M., Burgess, J. (2010): Making energy visible: A qualitative field study of how householders interact with feedback from smart energy monitors. *Energy Policy* 38: 6111-6119.
- [20] Strengers, Y. (2013): *Smart Energy Technologies in Everyday Life: Smart Utopia?* London: Palgrave Macmillan.
- [21] Liu, Y., Shutang, Y., Jin, T., Yingchen, Z., Yilu, L. Frequency Response Assessment and Enhancement of the U.S. Power Grids Toward Extra-High Photovoltaic Generation Penetrations—An Industry Perspective. *IEEE Transactions on Power Systems* 33 (3): 3438–49. 2018, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2799744>.
- [22] Starke, M.; Alkadi N.; Assessment of Industrial Load for Demand Response across U.S. Regions of the Western Interconnect, Oak Ridge National Laboratory, 2013.; <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub45942.pdf>

- [23] Finck, C, Li, R., Kramer, R., Zeiler, W. Quantifying demand flexibility of power-to-heat and thermal energy storage in the control of building heating systems. *Applied Energy* 209; 409-425 (2018)
- [24] Isaac, M.; Vuuren, D.; Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change, *Energy*, VL - 37, 507, 521, 2009, 10.1016/j.enpol.2008.09.051
- [25] Patteeuw, D.; Bruninx, K.; Arteconi, A.; Delarue, E.; D'haeseleer, W.; Helsen, L.; Integrated modeling of active demand response with electric heating systems coupled to thermal energy storage systems, *Applied Energy*, 151, 306, 319, 2015/08/01, 10.1016/j.apenergy.2015.04.014
- [26] Dowling, P.; The impact of climate change on the European energy system, *Energy Policy*, Volume 60, 2013, Pages 406-417, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.093>.
- [27] Yilmaz, H.; Ü.; Keles, D.; Chiodi, A.; Hartel, R.; Mikulić, M.; Analysis of the power-to-heat potential in the European energy system, *Energy Strategy Reviews*, Volume 20, 2018, Pages 6-19, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.009>.
- [28] Bloess, A., Schill W-P., Zerrahn, A. Power-to-Heat for Renewable Energy Integration: A Review of Technologies, Modeling Approaches, and Flexibility Potentials. *Applied Energy* 212: 1611–26. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.073>.
- [29] Vaghefi, A., Jafari, M.A., Bisse, E., Lu, Y., Brouwer, J. Modeling and Forecasting of Cooling and Electricity Load Demand. *Applied Energy* 136 (0): 186–96. 2014, <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.004>.
- [30] C. K. Lee, H. Liu, D. Fuhs, A. Kores, E. Waffenschmidt, "Smart Lighting Systems as a Demand Response Solution for Future Smart Grids," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 2362-2370, Sept. 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2890385.
- [31] Aghajanzadeh, A.; Wray C.; McKane, A.; Opportunities for Automated Demand Response in California Wastewater Treatment Facilities, August 2015, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1233609>
- [32] Aghajanzadeh, A., Therkelsen, P., 2019. Agricultural Demand Response for Decarbonizing the Electricity Grid. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.207>

- [33] Basmadjian, R. Flexibility-Based Energy and Demand Management in Data Centers: A Case Study for Cloud Computing. *Energies* **2019**, *12*, 3301. <https://doi.org/10.3390/en12173301>
- [34] Stadler, I.; Sterner, M.; 2.3 - Urban Energy Storage and Sector Coupling, Editor(s): Peter Droege, Urban Energy Transition (Second Edition), Elsevier, 2018, Pages 225-244, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102074-6.00026-7>.
- [35] Roberts, D. (2016) If you thought solar was going to hurt utilities, get a load of solar+storage. Washington, DC: Vox. Dostupno na: <https://www.vox.com/2016/2/5/10919082/solar-storage-economics>
- [36] Opetuk F. Tehno-ekonomska analiza primjene alternativnih goriva u sustavu prometa u energetskej tranziciji [Diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2019. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:825745>
- [37] Ren, H.; Zhang, A.; Wang, F.; Yan, X.; Li, Y.; Duić, N.; Shafie-khah, M.; Catalão, J. P. S.; Optimal scheduling of an EV aggregator for demand response considering triple level benefits of three-parties, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 125, 2021, 106447, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106447>.
- [38] Liu C, Chau KT, Wu D, Gao S. Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies. Proc IEEE 2013;101(11):2409–27. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2271951>
- [39] Harlow, J. E.; Ma, X.; Li, J.; Logan, E.; Liu, Y.; Zhang, N.; Ma, L.; Glazier, S. L.; Cormier, M. M. E.; Genovese, M.; Buteau, S.; Cameron, A.; Stark, J. E.; Dahn, J. R.; A Wide Range of Testing Results on an Excellent Lithium-Ion Cell Chemistry to be used as Benchmarks for New Battery Technologies, 2019, *J. Electrochem. Soc.* **166** A3031 <http://dx.doi.org/10.1149/2.0981913jes>
- [40] Limmer, S., Rodemann, T. Peak load reduction through dynamic pricing for electric vehicle charging. International Journal of Electrical Power and Energy Systems 113; 117-128 (2019)
- [41] <https://ionity.eu/en/design-and-tech.html>
- [42] https://www.tesla.com/hr_HR/blog/introducing-v3-supercharging?redirect=no
- [43] Yu, B.; Optimization of Smart Home Participating in Power Demand Response in the Context of the Internet of Things
- [44] Chen Z Y. Business Model of Smart Grid: Demand Response in Jiangsu Province. <https://www.docin.com/p-1984940731.htm>

-
- [45] <https://www.entsoe.eu/>
- [46] Drysdale, B.; Wu, J.; Jenkins, N.; Flexible demand in the GB domestic electricity sector in 2030, *Applied Energy*, Volume 139, 2015, Pages 281-290, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.013>.
- [47] CHEN, S., LIU, CC. From demand response to transactive energy: state of the art. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 5, 10–19 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0256-x>
- [48] Yoon, A.-Y., Kim, Y.-J., Zakula, T., & Moon, S.-I. (2020). Retail electricity pricing via online-learning of data-driven demand response of HVAC systems. *Applied Energy*, 265, 114771. doi:10.1016/j.apenergy.2020.114771
- [49] Svetec E. Primjena blockchain tehnologije na mikro-mrežama i obnovljivim izvorima energije [diplomski rad]. Varaždin: Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2019.
- [50] Andoni M, Robua V, Flynn D, Abramb S, Geach D, Jenkins D, McCallum D, Peacock A. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 100, Veljača 2019, 143-174 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- [51] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-greenddeal/actions-being-taken-eu_hr ; pristupljeno 15. 5. 2020.
- [52] Reymond M.; Patyn C.; Radulescu R.; Nowe A.; Deconinck G, Reinforcement Learning for Demand Response of Domestic Household Appliances, Vrije Universiteit Brussel , Brussels, Belgium, http://ala2018.it.nuigalway.ie/papers/ALA_2018_paper_40.pdf
- [53] Burger, C., Kuhlmann, A., Richard, P., Weinmann, J. Blockchain in the energy transition. A survey among decision-makers in the German energy industry. Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2016. https://www.esmt.org/system/files_force/dena_esmt_studie_blockchain_english.pdf
- [54] Mylrea, Michael E., and Gourisetti, Sri Nikhil Gup. *Blockchain for Smart Grid Resilience: Exchanging Distributed Energy at Speed, Scale and Security*. United States: N. p., 2017. Web. doi:10.1109/RWEEK.2017.8088642.
- [55] Safdar M, Hussain GA, Lehtonen M. Costs of Demand Response from Residential Customers' Perspective. *Energies* 2019, 12, 1617; doi:10.3390/en12091617