

# Modeliranje agregiranih energetskegkih ušteda kućanstava uz korištenje minimalnoga skupa potrebnih podataka

---

Luttenberger Marić, Leila

Doctoral thesis / Disertacija

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:102143>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-18**



*Repository / Repozitorij:*

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

LEILA LUTTENBERGER MARIĆ

**MODELIRANJE AGREGIRANIH ENERGETSKIH  
UŠTEDA KUĆANSTAVA UZ KORIŠTENJE  
MINIMALNOGA SKUPA POTREBNIH PODATAKA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2022.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

LEILA LUTTENBERGER MARIĆ

**MODELIRANJE AGREGIRANIH ENERGETSKIH  
UŠTEDA KUĆANSTAVA UZ KORIŠTENJE  
MINIMALNOGA SKUPA POTREBNIH PODATAKA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Marko Delimar

Zagreb, 2022.



University of Zagreb

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Leila Luttenberger Marić

**MODELLING OF AGGREGATED RESIDENTIAL  
ENERGY SAVINGS BASED ON MINIMAL  
AVAILABLE INPUT DATA SET**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Professor Marko Delimar, PhD

Zagreb, 2022.

Doktorski rad je izrađen na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na Zavodu za visoki napon i energetiku.

Mentor: Prof. dr. sc. Marko Delimar

Doktorski rad ima: 114 stranica

Doktorski rad br: \_\_\_\_\_

## O mentoru

Marko Delimar rođen je u Zagrebu 1974. godine. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao u polju elektrotehnike na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER), 1996., 2001. odnosno 2005. godine. Međunarodni poslijediplomski studij poslovnog upravljanja »Diploma Study in Management« završio je 1997. godine. Od 1997. godine zaposlen je na Zavodu za visoki napon i energetiku FER-a, trenutačno kao redoviti profesor.

Od 2013. godine do 2017. bio je član Koordinacijskog odbora Smartgrids ETP, odnosno Europske tehnološke platforme za napredne elektroenergetske mreže (European Technology Platform for the Electricity Networks of the Future). Od 2014. do 2018. godine bio je prodekan za nastavu FER-a. Od 2015. godine voditelj je studija dislociranog sveučilišnog preddiplomskog Studija energetske učinkovitosti i obnovljivih izvora u Šibeniku Sveučilišta u Zagrebu. Objavio je više od 100 radova u časopisima i zbornicima radova konferencija.

Prof. Delimar aktivan je član IEEE, HRO Cigré i udruge MIPRO. Član je upravljačkih, programskih i/ili znanstvenih te organizacijskih odbora više uglednih međunarodnih skupova i konferencija, te urednik za područje elektroenergetike u međunarodnom časopisu. Trenutačno je dopredsjednik i član Upravnog odbora IEEE Fondacije te član IEEE Odbora za europske javne politike.

## **About the Supervisor**

Marko Delimar was born in Zagreb in 1974. He received B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER), Zagreb, Croatia, in 1996, 2001 and 2005, respectively. He received a »Diploma Study in Management« (International postgraduate study in business management) degree from FER in 1997. From 1997 he is working at the Department of Energy and Power Systems at FER, currently as a full professor.

From 2013 to 2017 he was a member of the Steering Committee of the Smartgrids ETP (European Technology platform for the Electricity Networks of the Future). From 2014 to 2018 he served as Vice Dean for Education at FER. From 2015 he serves as head of the University of Zagreb dislocated university undergraduate Study of energy efficiency and Renewable Energy Sources in Šibenik. He published over 100 scientific articles in journals and conference proceedings.

Prof. Delimar is a member of IEEE, HRO Cigré and MIPRO. He is member of steering, program, scientific and/or organising committees of several prominent international conferences and symposia and a specialist editor for power and energy in an international journal. Currently he is serving as the Vice President and a member of the Board of the IEEE Foundation and as a member of the IEEE European Public Policy Committee.

## **Zahvala**

Ova disertacija je rezultat dugogodišnjeg istraživanja i dovršena je zahvaljujući podršci kolega, prijatelja i obitelji.

Prvenstveno zahvaljujem svom mentoru prof. Marku Delimaru, koji je imao ključnu ulogu u usmjeravanju ovog istraživanja i na njegovoj podršci kroz cijeli proces realizacije ovog rada. Hvala velika Stjepanu Sučiću i Hrvoju Keku jer sam uz njihovu podršku i iznimno vrijedne savjete uspješno dovršila doktorski studij i oblikovala ovu disertaciju. Posebna zahvala ide svim mojim kolegama iz Končara s kojima dijelim radnu svakodnevicu, a poglavito Donati Borić koja mi je pomogla u formuliranju ideja i čiji je doprinos bio neizmjerljivo važan za finalizaciju istraživanja. Hvala i svim mojim kolegama iz Energetskog instituta Hrvoje Požar za stečeno znanje i iskustvo. Posebno bih istaknula Vesnu Bukaricu koja mi je pomogla sa svojim izvanrednim savjetima.

Na kraju, htjela bih zahvaliti mojoj obitelji jer su me uvijek poticali da ne odustajem i da se hrabro borim. Osobita zahvala ide mom suprugu Lovorku, budući da bez njegovog ohrabivanja, razumijevanja i svakodnevnih potpore ova disertacija ne bi bila dovršena.



## **Sažetak**

Agregatori fleksibilnosti potrošnje predstavljaju nove dionike na tržištu energije koji su zaduženi za agregiranje fragmentiranih izvora fleksibilnosti i njihovu valorizaciju na tržištu. Ovaj rad razmatra mogućnost valorizacije fleksibilnosti potrošnje u cilju ostvarivanja ušteda energije. Za tu potrebu razvijen je model koji s relativno malo prikupljenih podataka daje mogućnost ocjene učinka takvog programa. Određivanje dostupne fleksibilnosti u kućanstvima otežava nedostupnost povijesnih podataka o potrošnji uređaja prikladne granularnosti i preciznosti. Metoda se zasniva na ekstrapolaciji iz minimalnog dostupnog skupa podataka, analizira ključne parametre koji utječu na potrošnju, primjenjuje regresijske modele te omogućava kvantifikaciju tako dobivene fleksibilnosti. Razvijeni model je prilagođen tipičnim obrascima korištenja kućanstava i potrošnje u mediteranskim zemljama gdje je dostupnost daljinskog grijanja uobičajeno manjkava. Rezultati koji su dobiveni iz modela gdje se prioritiziraju energetske uštede uz minimalni utjecaj na komfor korisnika, povoljni su za ona kućanstva čije zgrade pokazuju bolja energetska svojstva. U okviru ovog rada predloženi su i indikatori koji bi u stvarnom okruženju mogli olakšati kvantifikaciju fleksibilnosti u okviru standardiziranih procesa za praćenje i verifikaciju.

## **Ključne riječi**

Fleksibilnost potrošnje, energetske uštede, agregatori, lokalna energetska zajednica, odziv potrošnje, praćenje, verifikacija

## **Extended abstract**

### **MODELLING OF AGGREGATED RESIDENTIAL ENERGY SAVINGS BASED ON MINIMAL AVAILABLE INPUT DATA SET**

Flexibility aggregators can be a source of innovative aggregation solutions at the local level. The unexplored flexibility potential of households could create new revenue streams for local flexibility aggregators. Aggregators should overcome sociological and technological obstacles in order to activate final consumers in demand response flexibility programs. The limiting factors to unleash their market potential are numerous: the arduous assessment of the flexibility potential in households due to scarcity or absence of historical data with the desired granularity, lack of information of the installed loads in households, inconsistency between quality and quantity of collected data, low level of interoperability between the installed equipment, v response of consumers to external stimuli, varying socio-economic conditions of consumers and investment possibilities in home equipment, availability of the energy infrastructure (i.e. district heating networks), different building energy performances and climatological conditions, etc.

The creation of a sustainable business model for a local flexibility aggregator is a demanding task, especially while considering investment costs which are essential to provide an adequate information and communication framework for data collection, processing, and direct load control for home equipment. In addition, flexibility aggregator should establish a fair compensation for the activation of flexibility of their users (consumers), therefore creating a programme which is adapted to the needs of users, based on their specific characteristics, needs and requirements.

The fragmented and very often diverse household market represents both a challenge and an opportunity for the introduction of new business models. The synergetic approach that combines long-term energy savings achieved through energy efficiency measures and short-term energy savings achieved through flexibility activations opens an opportunity for flexibility aggregators to participate in both energy and energy savings markets.

This research builds up on the following hypotheses: there is a part of flexibility which could be activated from household consumers; the flexibility could be assessed with minimal available input data set; and finally, if properly identified, short-term flexibility activation could offer the opportunity to achieve permanent energy savings that can be adapted to different seasonal and

temporal conditions. The research elaborated in this thesis includes the energy consumption flexibility assessment of households, which could result in energy savings. Flexibility in this context is not used for the purpose of delaying or arbitrating consumption within a certain interval of time, but instead leads to permanent energy savings. This thesis provides a methodological framework for modelling flexibility sources in aggregated households, with supporting indicators which could facilitate the process of monitoring, verification, and quantification of predicted energy savings with a minimally available set of input data.

The thesis is introduced with the main features of the research area through the analysis of the flexibility aggregator business model and synergetic opportunities between flexibility activations and energy savings.. While energy savings are determined by measuring and/or evaluating the energy consumption before and after the implementation of energy efficiency measures, the demand response flexibility activations are defined as the change in load profiles of consumers in relation to their usual or immediate consumption patterns as a response to market signals. According to such definitions, energy savings are used to describe a permanent state of non-consumed energy, while the flexibility activations are a temporary phenomenon that may (or may not) result in permanent energy savings. The introduction of energy efficiency measured in households and the implementation of demand response flexibility programmes are occurrences that could be monitored synergistically for the purpose of achieving common goals in the energy transition. The values of both energy efficiency and demand response directly depend on daily, seasonal, and annual factors which are influencing energy consumption patterns. The energy efficiency obligation schemes (EEOS) framework and the obligations for achieving or purchasing energy savings for the obliged parties could encourage the creation of new business models and opportunities for flexibility aggregators. However, the methods used for monitoring and verification of energy savings within the EEOS are often based on the calculations correspondent to reference values, while the achieved savings are calculated for each observed year. The selection of a method for calculating savings achieved through a more dynamic scheme, which integrates the possibility for demand response activations, requires the establishment of customised parameters for measurement and verification in a dynamic environment. If the energy service provider in its portfolio also offers the activation of flexibility of the consumer assets, this should be considered as a separate measure to achieve savings. In such case, it is necessary to demonstrate

that the activation of demand-side flexibility in a short-term event activation leads to a permanent reduction of energy consumption. For the sake of including demand-side flexibility as a measure for achieving energy savings, the definition of applicable parameters for non-equivocal data interpretation is a must for ensuring proper monitoring and verification in *ex-post* analysis and programme impact assessment.

The possibilities and obstacles of activating consumption flexibility in households have been analysed through an overview of motivational factors, optimisation goals, guidelines for assessing consumption profiles, challenges in input data collection, as well as establishing an information and communication architecture for explicit demand response. The aspects for establishing a business model of a local flexibility aggregator for residential consumers could be summarized in three phases. The regulatory framework for the establishment of relationships between different stakeholders must be taken into consideration in the feasibility assessment, the implementation and evaluation phases. In the feasibility assessment phase, it is necessary to collect input data and develop extrapolation methods from existing data to assess the practicability of a demand response flexibility program. In the implementation phase, a flexibility aggregator should collect energy consumption data as well as data linked to parameters which are affecting consumption in the desired granularity. For a programme evaluation phase, collection of verified load profile (usually provided by the DSO) and demand response activation data is an absolute must. The existence of a technological and communication infrastructure data collection and storage as well as the establishment of a standardized architecture for demand response activation is mandatory in the implementation phase, while the ability to monitor information through its semantic interpretation is one of the key features to enable continuous evaluation of flexibility programmes. It is important to identify the motivational aspects for triggering the interest of customers to participate in demand response flexibility programmes in the initial phase and to apply appropriate strategies to raise customer awareness. This will provide consumers with adequate technical and customer support in the implementation phase. Consumers must recognize the long-term benefit for participating in flexibility programs. Finally, for the creation of a sustainable business model which is implementable in the long term, programme settlement goals need to be continuously updated and verified.

To investigate the possibility of establishing a consumption flexibility programme through a local aggregator that consolidates energy savings obtained by short-term activations, it is necessary to develop an appropriate model that would allow such an assessment with the minimum amount of available input data. The disadvantage of existing methods for assessing the potential of consumption flexibility is that they are strictly focused either on quantitative input data from interval meters, or on qualitative data collected via surveys.

An aggregated residential energy savings model is presented, which is evaluating the explicitly activated flexibility to achieve energy savings and the accompanying indicators for monitoring and verification of energy savings. The model allows qualitative and quantitative *ex-ante* analysis of key parameters which are influencing energy consumption. The model has been tested in a real case scenario which included twenty residential buildings on the island of Krk in Croatia. Considering the different resolutions of energy consumption data collected within a heterogeneous group of residential consumers, the modelling of consumption flexibility envisages mapping of typical flexibility asset consumption profiles with respect to key parameters. The modelling implies the quantification of the aggregated flexibility based on algorithms which identify feasible load reductions during the day to obtain energy savings. Based on the analysis of the given sample and identified key parameters, a simulation of possible activations was conducted using Markov chains. The developed model provides the possibility for predicting future activations and systemic quantification of savings obtained through short-term flexibility activations.

For this purpose, a modelling approach was implemented, using calculations for “Agent” buildings. In this way, each building user (consumer) was assigned to a specific “Agent” with dedicated consumption characteristics for a flexibility asset. The capacities engaged in a flexibility programme were modelled according to available flexibility assets, whilst the available flexibility was considered a function of building energy performance characteristics. Additionally, several energy savings activation scenarios were modelled to interlink technical and behavioural constraints of household consumers. These constraints restrict the available flexibility, thus influencing the possibility of daily repetitions of a DR event. This model is intended to optimise flexibility assets provided by the end-users and, in this manner, deliver permanent energy savings, offering new business opportunities for aggregators or local energy communities.

The proposed model facilitates the preliminary assessment of the effect of such a programme with minimal collected input data. Additionally, it delivers the opportunity for flexibility evaluation and prediction of future behaviour with qualitative and quantitative analysis of input data in the context of achieving permanent energy savings by grouping users within a homogenous group, which is defined by recognised parameters.

The developed model is adapted to typical patterns of household energy consumption in Mediterranean countries, where the availability of district heating networks is usually scarce. The results obtained from the simulations, where energy savings are prioritized, are extremely favourable for those households living in buildings with good thermal insulation characteristics. Also, these households are shown as good candidates for a relatively continuous number of flexibility activations over the entire heating season (October to April). The prediction of possible activations for households in the cooling season is much more complex, especially if observed in the conditions where all users are not permanently present. Permanent user analysis enables the establishment of a more stable regression model between key parameters that are affecting energy consumption.

Since energy savings cannot be directly measured by monitoring the effect of key parameters, it is possible to continuously evaluate the activation opportunities based on the collected data. Eight indicators were recognized within the scope of this research, which could facilitate *ex-post* monitoring and verification of energy savings in an explicit demand response activation program for household consumers. For the purpose of setting up such a programme, existing standards such as OpenADR and IEC 61850 are applicable as part of the functional architecture for flexibility activation and communication between aggregators and flexibility providers (households). When considering the possibility of monitoring and verifying the effect of a flexibility programme that provides energy savings, additional semantic information collected from devices and sensors is needed. This step is crucial to obtain a relevant *ex-post* analysis of the programme's impact. Existing data models (i.e. SAREF) offer such solutions, but semantic interoperability needs to be developed between communication standards and ontological data models. Interoperability must work on both a technical and a semantic level. For *ex-post* analysis and evaluation of program performance using monitoring and verification procedures, consistent and unambiguous interpretation of data is essential.

The additional novelty of this research is the recognition of an aggregator as a permanent energy savings provider, even if the obtained savings are very conservative per individual flexibility asset. The results obtained from this research demonstrate that energy efficiency characteristics in buildings and demand response flexibility load activation, both of which are a significant influence on the consumer's comfort, cannot be observed separately.

### **Keywords**

Flexibility, demand response, energy savings, aggregator, local energy community, monitoring, verification

# Sadržaj

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. PODRUČJE, CILJ I ZAHTJEVI ISTRAŽIVANJA.....	2
1.2. PREGLED RADA .....	2
<b>2. SINERGIJA FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE I ENERGETSKIH UŠTEDA .....</b>	<b>4</b>
2.1. INTEGRACIJA FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE NA POSTOJEĆEM TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	6
2.1.1. <i>Agregator na tržištu električne energije .....</i>	<i>7</i>
2.1.2. <i>Agregator kao pružatelj pomoćnih usluga operatorima sustava .....</i>	<i>10</i>
2.1.3. <i>Energetske zajednice građana.....</i>	<i>13</i>
2.2. MODALITETI AKTIVACIJE FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE KOD KUPACA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	15
2.3. PRAĆENJE I VERIFIKACIJA ENERGETSKIH UŠTEDA KROZ STANDARDIZIRANE PROTOKOLE.....	17
2.3.1. <i>Praćenje i verifikacija mjera energetske učinkovitosti .....</i>	<i>17</i>
2.3.2. <i>Praćenje i verifikacija odziva potrošnje.....</i>	<i>19</i>
2.4. POSLOVNI MODELI ZA SINERGIJSKO DJELOVANJE ENERGETSKIH UŠTEDA I FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE.....	21
2.4.1. <i>Obveza ostvarivanja ušteda energije u neposrednoj potrošnji i trgovanje uštedama.....</i>	<i>26</i>
<b>3. AKTIVACIJA FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE U KUĆANSTVIMA .....</b>	<b>29</b>
3.1. MOTIVACIJSKI FAKTORI ZA UKLJUČIVANJE KRAJNJIH POTROŠAČA U PROGRAME FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE .....	30
3.1.1. <i>Utjecaj maloprodajnih cijena električne energije na uključivanje aktivnih kupaca u programe fleksibilnosti potrošnje.....</i>	<i>32</i>
3.2. OPTIMIZACIJSKI CILJEVI ZA AKTIVACIJU FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE I OGRANIČAVAJUĆI PARAMETRI .....	35
3.3. SMJERNICE ZA PROCJENU PROFILA POTROŠNJE I NJEGOVU KONTINUIRANU EVALUACIJU U PROGRAMIMA FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE .....	38
3.3.1. <i>Standardizirane metode procjene profila potrošnje kroz protokole za praćenje i verifikaciju....</i>	<i>41</i>
3.3.2. <i>Nestandardizirane metode procjene profila potrošnje s visokom granularnošću ulaznih podataka .....</i>	<i>43</i>



3.4.	PRIKUPLJANJE I RAZMJENA PODATAKA .....	44
3.5.	INFORMACIJSKO-KOMUNIKACIJSKO UPRAVLJAČKA ARHITEKTURA ZA EKSPlicitNO UPRAVLJANJE POTROŠNJOM .....	46
3.5.1.	<i>OpenADR (Open Automated Demand Response) - IEC 62746</i> .....	47
3.5.2.	<i>IEC 62939 (Smart Grid User Interface Standard)</i> .....	48
3.6.	ASPEKTI USPOSTAVLJANJA POSLOVNOG MODELA LOKALNOG AGREGATORA FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE KUĆANSTVA .....	50
<b>4.</b>	<b>AGREGIRANJE FLEKSIBILNOSTI KUĆANSTAVA .....</b>	<b>53</b>
4.1.	POSTOJEĆE METODE ZA PROCJENU POTROŠNJE I POTENCIJALA FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE U KUĆANSTVIMA .....	53
4.1.1.	<i>Procjena prema podacima iz naprednih brojila</i> .....	53
4.1.2.	<i>Procjena prema podacima iz upitnika</i> .....	54
4.2.	NEDOSTACI POSTOJEĆIH METODA .....	55
4.3.	PRAĆENJE KLJUČNIH PARAMETARA KOJI UTJEČU NA UŠTEDE ENERGIJE .....	56
4.4.	STUDIJA SLUČAJA .....	56
4.5.	METODOLOGIJA I PRISTUP .....	57
4.5.1.	<i>Ulazni podaci</i> .....	58
4.5.2.	<i>Analiza potrošnje „predstavnik“ i izračun specifične potrošnje za grijanje</i> .....	60
4.5.3.	<i>Kategorizacija korisnika i mapiranje specifične potrošnje za grijanje</i> .....	68
4.6.	ODREĐIVANJE KLJUČNIH INDIKATORA ZA PRAĆENJE I VERIFIKACIJU ENERGETSKIH UŠTEDA .....	69
<b>5.</b>	<b>KVANTIFIKACIJA FLEKSIBILNOSTI KUĆANSTAVA .....</b>	<b>75</b>
5.1.	MODELIRANE VRIJEDNOSTI .....	76
5.1.1.	<i>Modeliranje angažirane snage</i> .....	76
5.1.2.	<i>Simulacija rada sustava</i> .....	79
5.2.	ALGORITAM ZA OPTIMIZIRANJE UŠTEDA ENERGIJE BEZ UTJECAJA NA UGODU KORISNIKA .....	81
5.2.1.	<i>Rezultati</i> .....	82
5.3.	KORELACIJSKE ANALIZE .....	86
5.4.	DIJAGRAM TOKA ZA IZRAČUN ENERGETSKIH UŠTEDA U OKVIRU MODELA .....	88
5.5.	REZULTATI MODELA .....	90

5.5.1.	<i>Kvantifikacija energetske uštede</i> .....	90
5.5.2.	<i>Vjerojatnosti aktivacija</i> .....	93
<b>6.</b>	<b>ZNANSTVENI DOPRINOS I NASTAVAK ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>97</b>
6.1.	IZVORNI ZNANSTVENI DOPRINOS .....	97
6.2.	SMJERNICE NASTAVKA ISTRAŽIVANJA .....	98
<b>7.</b>	<b>DISKUSIJA</b> .....	<b>99</b>
<b>8.</b>	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	<b>101</b>
	<b>LITERATURA</b> .....	<b>103</b>
	<b>PRIVITAK A – REZULTATI PROVEDENE ANKETE</b> .....	<b>115</b>
	<b>BIOGRAFIJA</b> .....	<b>117</b>
	<b>OBJAVLJENI RADOVI IZ PODRUČJA ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>118</b>
	<b>BIOGRAPHY</b> .....	<b>119</b>

## Popis slika

Slika 1 Model tržišta - agregator i opskrbljivač s bilateralnim ugovorom (prema primjeru iz [12]) .....	8
Slika 2 Model tržišta - agregator i opskrbljivač bez bilateralnog sporazuma (prema primjeru iz [12]) .....	9
Slika 3 Model tržišta - bez bilateralnog sporazuma između opskrbljivača i agregatora za središnjim entitetom (prema primjeru iz [12]).....	10
Slika 4 Model tržišta s agregatorom kao pružateljem pomoćnih usluga operatorima sustava .....	11
Slika 5 Slikoviti prikaz potrošnje prije i nakon primjene mjera energetske učinkovitosti (prema primjeru iz [31]) .....	18
Slika 6 Kvantifikacija fleksibilnosti pomoću procedura za praćenje i verifikaciju unutar jednog sata (prema primjeru iz [32]).....	19
Slika 7 Iterativni proces praćenja i verifikacije odziva potrošnje .....	20
Slika 8 Novčani tok u tradicionalnim subvencijskim shemama (prema primjeru iz [39]) .....	24
Slika 9 Novčani tok u P4P shemama (korišten primjer iz [39]).....	24
Slika 10 Model agregator energetskih ušteda u okviru P4P sheme .....	25
Slika 11 Cijene električne energije za kućanstva u drugoj polovici 2021. godine [68].....	33
Slika 12 Dinamika kretanja cijena električne energije u krajnjoj potrošnji [68].....	34
Slika 13 Primjer aktivacije fleksibilnosti potrošnje .....	39
Slika 14 Primjer odnosa ukupne potrošnje komercijalne zgrade i vanjske temperature.....	40
Slika 15 Koncepti VTN i VEN u kontekstu IEC 62939 i IEC 62746.....	49
Slika 16 Sekvencijski dijagram za modeliranje agregiranih energetskih ušteda kućanstva uz korištenje minimalnog skupa potrebnih ulaznih podataka.....	58
Slika 17 Regresijska analiza ukupne mjesečne potrošnje "predstavnik 1" u odnosu na vanjsku temperaturu.....	61

Slika 18 Usporedna analiza specifične mjesečne potrošnje električne energije za grijanje u odnosu na vanjsku temperaturu .....	62
Slika 19 Potrošnja klima uređaja unutar 12 sati rada [izvor: [137]] .....	66
Slika 20 Analiza odnosa ukupne potrošnje električne energije "predstavnik 3" i CDD .....	66
Slika 21 Koraci u analizi potrošnje „predstavnik“ i izračunu specifične potrošnje .....	67
Slika 22 Prikaz mjesečne potrošnje električne energije za grijanje .....	69
Slika 23 Primjer klasa i hijerarhije unutar SAREF ontologije [144] .....	73
Slika 24 Slikoviti prikaz strategija za aktivaciju .....	76
Slika 25 Primjer aktivacija fleksibilnosti unutar istog dana u siječnju .....	83
Slika 26 Primjer aktivacija fleksibilnosti unutar istog dana u veljači .....	84
Slika 27 Primjer aktivacija fleksibilnosti za dva karakteristična dana u lipnju i kolovožu.....	85
Slika 28 Rezultati simulacije - aktivacija fleksibilnosti u režimu grijanja.....	86
Slika 29 Rezultati simulacije - aktivacija fleksibilnosti u režimu hlađenja .....	86
Slika 30 Regresijski model za broj aktivacija i aktivnog rada sustava - grijanje.....	87
Slika 31 Regresijski model za broj aktivacija i aktivnog rada sustava – hlađenje.....	87
Slika 32 Algoritam za izračun energetske uštede razvijen u okviru modela .....	89
Slika 33 Procijenjene uštede energije za grijanje u tri tipična dana (%).....	90
Slika 34 Procijenjene ukupne uštede energije u kWh .....	91
Slika 35 Procijenjene uštede energije za grijanje u tri tipična dana (%) s primijenjenim ograničenjima za korištenje FN.....	91
Slika 36 Procijenjene ukupne uštede energije u kWh .....	92
Slika 37 Procijenjene uštede energije za hlađenje u jednom danu u kolovožu.....	93
Slika 38 Markovljev lanac – interval aktivacija za grijanje (loša izolacija) .....	94

## Popis tablica

Tablica 1 Aspekti uspostavljanja poslovnog modela lokalnog agregatora fleksibilnosti potrošnje kroz faze .....	51
Tablica 2 Sintetizirani opis ulaznih podataka koji su korišteni u istraživanju .....	59
Tablica 3 Opis "predstavnik" za modeliranje .....	60
Tablica 4 Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za referentne klimatske podatke [132].....	64
Tablica 5 Modelirana specifična potrošnja električne energije za grijanje u referentnim mjesecima .....	64
Tablica 6 Kategorizacija korisnika i mapiranje specifične potrošnje.....	68
Tablica 7 Opis korisnika za modalitet hlađenja .....	78
Tablica 8 Matrica tranzicije - aktivacije fleksibilnosti za zgrade loše izolacije u sezoni grijanja	94
Tablica 9 Matrica tranzicije - aktivacije fleksibilnosti za zgrade normalne izolacije u sezoni grijanja.....	95
Tablica 10 Matrica tranzicije - aktivacije fleksibilnosti za zgrade loše izolacije u sezoni grijanja .....	95
Tablica 11 Matrica tranzicije - aktivacije za hlađenje.....	96

## Popis kratica

AI	umjetna inteligencija (eng. <i>artificial intelligence</i> )
aFRR	rezerva za ponovnu uspostavu frekvencije koja se aktivira automatskim regulatorom (eng. <i>automatic frequency restoration reserve</i> )
BG	bilančna grupa
CDD	stupanj dan hlađenja
CPUC	<i>California Public Utilities Commission</i>
COSEM	<i>Companion Specification for Energy Metering</i>
DLC	izravno upravljanje trošilima (eng. <i>direct load control</i> )
DLSM	<i>Device Language Message Specification</i>
ECM	mjere očuvanja energije (eng. <i>energy conservation measures</i> )
EES	elektroenergetski sustav
EPC	ugovor o energetske učinku (eng. <i>energy performance contract</i> )
ESCO	tvrtka za pružanje energetske usluga (eng. <i>energy service company</i> )
EU	Europska unija
EUR	euro
EVO	Organizacija za vrednovanje učinkovitosti (eng. <i>Efficiency Valuation Organization</i> )
ENTSO-E	Europska mreža operatera prijenosnih sustava za električnu energiju
$E_{grijanje,TP}$ mjesečno	udio električne energije namijenjene za grijanje, mjesečno
$E_{grijanje,TP}$ godišnje	ukupna električna energija angažirana za grijanje u promatranoj godini
$E_{grijanje,TP}$ spec mjesečno	specifična električna energija angažirana za grijanje, mjesečno

<i>E</i> <sub>grijanje,TP spec godišnje</sub>	specifična električna energija angažirana za grijanje, godišnje
FES	uštede energije u neposrednoj potrošnji (eng. <i>final energy savings</i> )
FCR	rezerva za održavanje frekvencije (eng. <i>frequency containment reserves</i> )
FN	fotonapon
HDD	stupanj dan grijanja
HTPP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
HVAC	sustav za grijanje, ventilaciju i hlađenje (eng. <i>heating, ventilation and air conditioning</i> )
IEC	Međunarodna elektrotehnička komisija (eng. <i>International Electrotechnical Commission</i> )
IPMVP	Međunarodni protokol za mjerenje i verifikaciju učinaka (eng. <i>International Performance Measurement and Verification Protocol</i> )
kWh	kilovat-sat
kWh/m <sup>2</sup>	kilovat-sat po metru kvadratnom
LBNL	Nacionalni laboratorij Lawrence Berkeley (eng. <i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i> )
mFCR	rezerva za ponovnu uspostavu frekvencije koja se aktivira ručno po nalogu operatora sustava (eng. <i>manual frequency restoration reserve</i> )
m <sup>2</sup>	kvadratni metar
ML	strojno učenje (eng. <i>machine learning</i> )
<i>n</i> <sub>fleksibilnosti</sub>	broj aktivacija fleksibilnosti
NAPDR	Nacionalni implementacijski akcijskog plana za odziv potrošnje (eng. <i>National Action Plan for Demand Response</i> )
NIALM	<i>Non-intrusive Appliance Load Monitoring</i>
NEMVP	Sjevernoamerički protokol za mjerenje i verifikaciju energije (eng. <i>North American Energy Measurement and Verification Protocol</i> )

NILM	<i>Non-intrusive Load Monitoring</i>
NKO	nadomjesna krivulja opterećenja
$\eta_a$	učinak aktivacija
$\eta_{EE}$	omjer samodostatnosti
ODS	operator distribucijskog sustava
OMM	obračunsko mjerno mjesto
OpenADR	<i>Open Automated Demand Response</i>
OPS	operator prijenosnog sustava
PLC	<i>power line carrier</i>
P4P	plaćanje prema učinku (eng. <i>pay-for-performance</i> )
R	toplinski otpor
$Q_{H,nd}$	specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za referentne klimatske podatke
$P_{el \text{ kompresor}}$	snaga kompresora
$R^2$	koeficijent determinacije
SAD	Sjedinjene Američke Države
SAREF	<i>Smart Appliances REference ontology</i>
SRI	<i>smart readiness indicator</i>
SPF	sezonski faktor grijanja (eng. <i>seasonal performance factor</i> )
$t_a$	trajanje aktivacije
$T_u$	unutrašnja temperatura
$T_v$	vanjska temperatura



$t_z$	trajanje zahtjeva aktivacije
$t_{rad\ sustava}$	vrijeme rada sustava, kompresora
U	koeficijent prolaska topline
UFES	jedinične uštede energije u neposrednoj potrošnji (eng. <i>unit final energy savings</i> )
VEN	virtualni krajnji čvor (eng. <i>Virtual End Node</i> )
VTN	virtualni glavni čvor (eng. <i>Virtual Top Node</i> )
XML	<i>Extensible Metadata Platform</i>
°C	Celzijev stupanj

# 1. UVOD

Integracija programa fleksibilnosti potrošnje, koji potiče krajnje potrošače na aktivno sudjelovanje u elektroenergetskom sustavu, jedna je prioriteta tema energetske tranzicije i demokratizacije elektroenergetskog sustava. Kroz paket „Čista energija za sve Europljane“ [1] potiču se krajnji korisnici mreže svih kategorija potrošnje na aktivno sudjelovanje u ostvarivanju energetske, klimatske i ekološke ciljeve. Uvođenjem novih entiteta na tržištu električne energije - agregatora i lokalnih energetske zajednice - olakšava se pristup krajnjim potrošačima na tržištu električne energije i pomoćnih usluga; ali se istovremeno otvara mogućnost za lokalnu razmjenu električne energije odnosno optimizaciju proizvodnje i potrošnje. Lokalni agregatori fleksibilnosti moraju osigurati održivost poslovnog modela i strateški pristupiti korisnicima za ostvarivanje određenih ciljeva. Korisnici su u tom slučaju klasični kupci električne energije u kategoriji kućanstava koji se zbog određenih motivacijskih faktora uključuju u programe fleksibilnosti potrošnje.

Lokalni agregator fleksibilnosti potrošnje ima kompleksnu ulogu jer, između ostalog, mora premostiti sociološke i tehnološke prepreke za aktivaciju krajnjih potrošača u programima fleksibilnosti potrošnje. Jedan od značajnijih ograničavajućih faktora za agregatore fleksibilnosti je otežana procjena potencijala fleksibilnosti u kućanstvima zbog: manjka ili nedostatka povijesnih podataka sa željenom rezolucijom, nedostatka informacija o instaliranoj opremi u kućanstvima i niske razine interoperabilnosti, različitog odgovora potrošača na vanjske poticaje, društveno-ekonomskih uvjeta potrošača i ulaganja u najsuvremeniju opremu, dostupnosti energetske infrastrukture (daljinsko grijanje), različitosti energetske svojstava zgrada i različitih klimatoloških uvjeta.

Stvaranje održivog poslovnog modela za lokalnog agregatora fleksibilnosti nije jednostavan zadatak, pogotovo ako se promatraju investicijski troškovi koje agregator mora pokriti da bi osigurao odgovarajući informacijsko-komunikacijski upravljački okvir za prikupljanje i obradu podataka kao i eventualno upravljanje kućnim trošilima. Osim osiguravanja tehnološkog okvira, agregatori fleksibilnosti moraju uspostaviti sustav pravedne kompenzacije za aktivaciju fleksibilnosti svojim korisnicima. Također, moraju oformiti program koji je prilagođen potrebama korisnika, a temeljen na njihovim specifičnim karakteristikama, potrebama i zahtjevima.

Fragmentirano, i vrlo često nehomogeno, tržište kućanstava predstavlja istovremeno izazov i priliku za uvođenje novih poslovnih modela. Sinergijskim djelovanjem poslovnih modela koji objedinjavaju dugoročno ostvarivanje energetske učinka u kućanstvima i aktivaciju fleksibilnosti potrošnje za stvaranje kratkotrajnih ušteda, otvara se prilika agregatorima fleksibilnosti za sudjelovanje na tržištu energetske ušteda.

Početne hipoteze ovog istraživanja su postojanje dijela fleksibilnosti koje je iskoristivo kod krajnjih korisnika u kućanstvima, iskoristivost fleksibilnosti s razmjerno malo prikupljenih podataka te da fleksibilnost nudi priliku za ostvarivanje trajnih ušteda u krajnjoj potrošnji koje se mogu prilagoditi sezonalno i temporalno zahtjevnim načinima korištenja.

## **1.1. Područje, cilj i zahtjevi istraživanja**

Područje istraživanja ovog rada obuhvaća procjenu fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima koja rezultira energetske uštedama. Fleksibilnost se u ovom kontekstu ne koristi u svrhu odgađanja ili arbitriranja potrošnje unutar određenog vremenskog intervala, već mora rezultirati trajno nepotrošenom energijom.

Cilj istraživanja je pružiti metodološki okvir kojim bi se omogućilo modeliranje izvora fleksibilnosti kod agregiranih kućanstava uz pomoć odgovarajućih indikatora za praćenje, verifikaciju i kvantifikaciju predviđenih ušteda energije uz minimalno dostupan skup ulaznih podataka.

Temeljni zahtjevi istraživanja su omogućiti procjenu fleksibilnosti potrošnje s razmjerno malo prikupljenih podataka i ponuditi priliku za uvođenje novih poslovnih modela kroz ostvarivanje trajnih ušteda u neposrednoj potrošnji koje se mogu prilagoditi sezonski i temporalno zahtjevnim načinima korištenja.

## **1.2. Pregled rada**

Rad je organiziran na slijedeći način. Drugo poglavlje daje detaljan uvid u glavne značajke područja istraživanja, kroz analizu poslovnog modela agregatora fleksibilnosti i mogućnosti sinergije fleksibilnosti potrošnje i energetske ušteda. Treće analizira mogućnosti i prepreke aktivacije fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima, uz pregled motivacijskih faktora, optimizacijskih

ciljeva, smjernica za procjenu profila potrošnje, izazove pri prikupljanju ulaznih podataka i uspostavljanje informacijsko-komunikacijske upravljačke arhitekture za eksplicitno upravljanje potrošnjom.

U četvrtom poglavlju prikazan je predložen model agregiranja kućanstava i prateći indikatori za praćenje i verifikaciju energetske uštede. Peto poglavlje prikazuje metodu za kvantifikaciju fleksibilnosti kućanstava uz minimalno dostupan skup ulaznih podataka. U šestom poglavlju dan je pregled ostvarenog znanstvenog doprinosa. Sedmo poglavlje posvećeno je diskusiji, dok su zaključci istraživanja obrađeni u osmom poglavlju.

## 2. SINERGIJA FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE I ENERGETSKIH UŠTEDA

Tranzicija prema održivom elektroenergetskom sustavu (EES), koji će u potpunosti omogućiti cjelovitu integraciju obnovljivih izvora energija u prijenosnoj i distribucijskoj mreži, otvara prostor za razvoj inovativnih rješenja. Varijabilna proizvodnja iz sunčanih i vjetroelektrana nameće potrebu operatorima mreže za pronalaženje novih alata koji bi doprinijeli rješavanju novih izazova za održavanje stabilnog i sigurnog pogona EES-a. Postepena dekarbonizacija EES, kojoj poglavito teži Europska unija [1], neće biti moguća bez ostvarivanja dugoročnih ušteda energije u neposrednoj potrošnji.

Energetske uštede u neposrednoj potrošnji ostvarive su primjenom mjera energetske učinkovitosti. Energetska učinkovitost jedna je od ključnih alata za postizanje ambicioznih klimatskih ciljeva, poput smanjenja ovisnosti o fosilnim gorivima iz inozemstva, povećanja sigurnosti opskrbe i proliferacije obnovljivih izvora energije na razini Europske unije (EU). S druge strane, dinamično upravljanje kroz aktivaciju fleksibilnosti teži ka istim ciljevima uz dodatno osnaživanje uloge aktivnih kupaca.

Međusobnom sinergijom energetske učinkovitosti i fleksibilnosti potrošnje u svim segmentima potrošnje (industrija, uslužni sektor i kućanstva) moguće je postići značajne uštede energije. Da bi se njihova sinergija odredila, potrebno je definirati značenja pojedinih pojmova sukladno tehničkim pravilima i relevantnim direktivama EU.

Energetska učinkovitost može se definirati kao omjer između ostvarenog učinka energije i utroška energije, dok ušteda energije označava količinu uštedene energije utvrđena mjerenjem i/ili procjenjivanjem potrošnje prije i nakon provedbe mjere za poboljšanje energetske učinkovitosti [2].

Fleksibilnost potrošnje podrazumijeva odziv potrošnje (eng. *demand response*) i definira promjenu u opterećenju električnom energijom kod krajnjih kupaca u odnosu na njihove uobičajene ili trenutačne obrasce potrošnje kao odgovor na tržišne signale [3] (promjena cijene električne energije, novčani poticaji, kao odgovor na prihvata ponude krajnjeg kupca, za prodaju smanjenja ili povećanja potrošnje po cijeni na organiziranim tržištima).

Prema samim definicijama razvidno je da se energetska ušteda koristi za opisivanje trajnog stanja u pogledu nepotrošene energije, dok je fleksibilnost potrošnje privremena pojava koja može (ali ne mora) rezultirati trajno nepotrošenom energijom. Primjena mjera energetske učinkovitosti koje rezultiraju energetske uštedama i aktivacija fleksibilnosti potrošnje kroz odziv potrošnje pojave su koje je moguće pratiti sinergijski u svrhu ostvarivanja zajedničkih ciljeva u energetske tranziciji. Vrijednosti energetske učinkovitosti i odziva potrošnje izravno ovise o dostupnosti energije, odnosno o dnevnim, sezonskim i godišnjim promjenama [4], ali i o cijenama električne energije. Valorizacija odziva potrošnje na tržištu energije i pomoćnih usluga izravno ovisi o rastu udjela obnovljivih izvora energije, ugroženosti pouzdanosti EES-a te mogućnosti odgađanja kapitalnih investicija u mreži.

Primjena mjere energetske učinkovitosti izravno pogoduje ostvarivanju trajnih energetske i novčanih ušteda, dok valorizacija aktivacije odziva potrošnje uvelike ovisi o tržišnim i vremenskim uvjetima, ponudama, regulatornom okviru, te dostupnom vremenu za aktivaciju. Postoje značajne razlike u tome kako se učinci mjera energetske učinkovitosti i odziva potrošnje obračunavaju, isporučuju i nagrađuju na tržištu.

Načelo „energetska učinkovitost prvo“ (eng. *Energy Efficiency First*) [5], koje promiče EU, govori o tome kako treba davati prioritet mjerama energetske učinkovitosti (koje podrazumijevaju energetske uštede i fleksibilnost potrošnje) u svim segmentima planiranja novih investicija u EES, odnosno u kućanstvima, komercijalnim zgradama, industriji i prometu. Spomenuto načelo primjenjuje se na svaku aktivnost koja izravno ili neizravno može doprinijeti smanjenju potrošnje električne energije, tj. ostvarivanju energetske ušteda. Na razini donošenja odluka jasno je da je promicanje energetske učinkovitosti nužno za ostvarivanje kratkoročnih i dugoročnih ciljeva energetske tranzicije.

Nameće se potreba za analizom inventara fleksibilnosti koji može ostvariti uštede u neposrednoj potrošnji električne energije te ujedno razmotriti mogućnosti valoriziranja fleksibilnosti potrošnje kroz energetske uštede.

## 2.1. Integracija fleksibilnosti potrošnje na postojećem tržištu električne energije

Ostvarivanje značajnih ušteda u neposrednoj potrošnji i eksploatacija potencijala fleksibilnosti potrošnje neće biti moguće bez uključivanja krajnjih potrošača u proces tranzicije elektroenergetskog sustava. Agregatori fleksibilnosti i lokalne energetske zajednice ključni su dionici za aktivaciju potencijala fleksibilnosti krajnjih potrošača električne energije [6] i mogu imati važnu ulogu u osiguravanju učinkovitog koordiniranog djelovanja distribuiranih izvora energije [7]. Unutar Europske unije, potencijal fleksibilnosti potrošnje je prepoznat kao vrijedan alat za oplemenjivanje distribucijskih mreža i integraciju obnovljivih izvora energije [8] što je vidljivo i u priznanju njegove vrijednosti relevantnim direktivama. Direktiva o energetske učinkovitosti 2012/27/EU [9] je već 2012. godine u okviru članka 15 definirala tehničke i ugovorne uvjete koje države članice moraju zadovoljiti da bi omogućile integraciju izvora fleksibilnosti na tržištu energije i tržištu pomoćnih usluga. U okviru Direktive o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije 2019/994/EU [3], odnosno članka 17, formalizirana je obveza država članica za uklanjanje prepreka uvođenju agregacije fleksibilnosti na tržištima.

Prema aktualnom regulatornom okviru (u [3] i [10]), agregator je dionik tržišta električne energije koji se bavi agregiranjem. Agregiranje se prema Zakonu o tržištu električne energije [10], definira kao „djelatnost koju obavlja pravna ili fizička osoba koja može kombiniranjem snage i/ili iz mreže preuzete električne energije više kupaca električne energije ili operatora skladišta energije ili snage i/ili u mrežu predane električne energije više proizvođača ili aktivnih kupaca ili operatora skladišta energije sudjelovati na bilo kojem tržištu električne energije.“

Aktivni kupac je definiran u [3] i [10] kao krajnji kupac koji troši ili skladišti električnu energiju proizvedenu u vlastitom prostoru; ili prodaje električnu energiju koju sam proizvodi; ili sudjeluje u programu fleksibilnosti; ili u programima energetske učinkovitosti. Agregator fleksibilnosti kombinira više kratkotrajnih opterećenja potrošača, tj. aktivnih kupaca, za prodaju ili dražbu na organiziranim tržištima energije [11].

### 2.1.1. Agregator na tržištu električne energije

Na tržištu električne energije, agregator ostvaruje svoju poziciju u okviru bilančne grupe (BG), kao njen član ili voditelj koji je odgovoran za odstupanja. U teoriji, agregator fleksibilnosti na tržištu električne energije djeluje u suprotnom smjeru od opskrbljivača. Opskrbljivač obavlja djelatnost opskrbe energijom i kupuje energiju na veleprodajnom tržištu (burzi električne energije) za svoje kupce, dok agregator kupuje fleksibilnost od svojih korisnika i nudi ju na veleprodajnom tržištu.

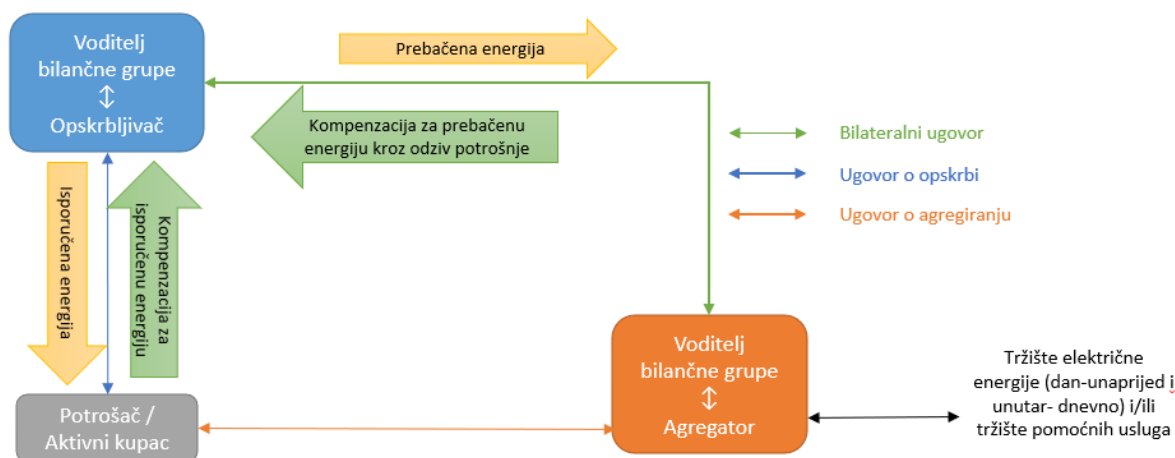
Opskrbljivači električne energije mogu svoje kupce poticati na odziv potrošnje kroz uvođenje dinamičkih tarifa (implicitni odziv) ili izravnim upravljanjem njihovim uređajima (eksplicitni odziv). U tom slučaju, agregator i opskrbljivač predstavljaju isti entitet na tržištu električne energije, a ugovor o opskrbi električne energije morao bi sadržavati klauzule, modalitete i kompenzacijske iznose za pružanje fleksibilnosti. Mogućnost aktivacije eksplicitnog odziva potrošnje kod kupaca električne energije pružila bi dodatan alat opskrbljivačima za optimizaciju svog portfelja. S porastom cijena električne energije na veleprodajnom tržištu, može se u skorijoj budućnosti očekivati integracija fleksibilnosti potrošnje unutar Ugovora o opskrbi električnom energijom.

Na tržištu električne energije agregator može djelovati kao nepovezani subjekt s opskrbljivačem krajnjih kupaca, odnosno kao neovisni agregator. Postoji nekoliko modela za rješavanje odnosa između opskrbljivača i neovisnog agregatora na tržištu električne energije koji su pragmatično opisani u preporukama [12] Europske mreže operatera prijenosnih sustava za električnu energiju (ENTSO-E).

1. *Model bilateralnog sporazuma*: sporazum se sklapa zbog rješavanja pitanja razlike između isporučene energije kupcu od strane opskrbljivača i energije koju kupac (putem agregatora) plasira na tržište kao odziv potrošnje. Za kompenzaciju odstupanja opskrbljivača, koja je rezultat razlike između ugovorene i isporučene energije prema kupcima uzrokovane aktivacijom odziva potrošnje, odgovoran je agregator, tj. pripadajuća mu BG. Bilateralnim ugovorom rješavaju se pitanja naknade za tzv. „prebačenu energiju“ između BG opskrbljivača i BG agregatora. Agregator fleksibilnosti trguje s dobivenom energijom na tržištu dan-unaprijed, unutar-dnevnom ili na tržištu pomoćnih usluga. Potrošač električne



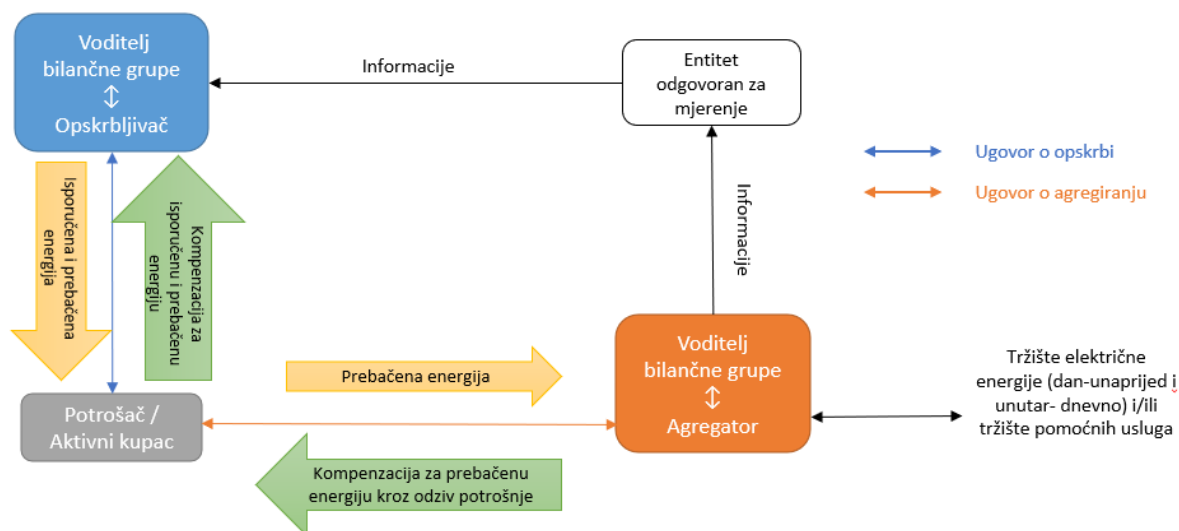
energije u ovom modelu ne dobiva kompenzaciju za aktiviranu fleksibilnost izravno od agregatora, već mu se aktivirana fleksibilnost obračunava kroz račun za opskrbu električne energije tako da se iznos naknade za isporučenu energiju umanjuje za iznos naknade za aktiviranu fleksibilnost (prebačena energija). Održivost ovog modela (slika 1) ovisi o spremnosti i volji opskrbljivača da sklope bilateralni ugovor s agregatorima, odnosno pripadajućim bilančnim grupama



Slika 1 Model tržišta - agregator i opskrbljivač s bilateralnim ugovorom (prema primjeru iz [12])

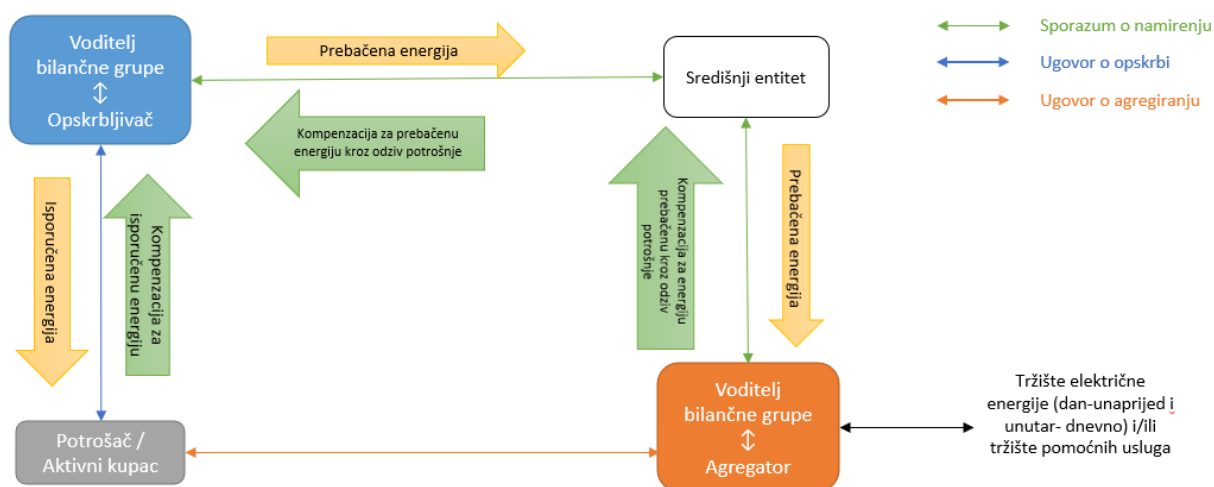
2. *Model bez bilateralnog sporazuma između opskrbljivača i agregatora:* svako odstupanje (ugovorena i ostvarena energija) u jednom obračunskom intervalu ide na teret agregatora odnosno njegove bilančne grupe. Neovisni entitet koji mora pratiti neuravnoteženja i pravovremeno informirati BG opskrbljivača o odstupanjima između planirane i ostvarene (isporučene) energije je entitet koji je odgovoran za mjerenje, a u praksi to može biti operator prijenosnog ili distribucijskog sustava. Agregatori, odnosno pripadajuća BG, moraju dostavljati raspored aktivacija operatorima sustava. Isto tako, operatoru sustava moraju pravovremeno informirati BG s opskrbljivačem o rasporedu aktivacija fleksibilnosti, u njihovom portfelju kupaca, kako bi se izbjeglo dvostruko uravnoteženje. Energija dobivena iz aktivirane fleksibilnosti krajnjih potrošača (kupaca), a s kojom agregator dalje trguje na tržištu, obračunava se kao „isporučena“ energija u zadanom obračunskom razdoblju od

strane opskrbljivača. Kompenzaciju za aktiviranu fleksibilnost potrošači dobivaju izravno od agregatora. U ovom modelu (slika 2) potrošači dobivaju dvostruki obračun za aktiviranu fleksibilnost: kroz račun za opskrbu energijom u obliku isporučene energije (rashod) i kompenzaciju za aktiviranu fleksibilnost (prihod) od agregatora.



Slika 2 Model tržišta - agregator i opskrbljivač bez bilateralnog sporazuma (prema primjeru iz [12])

3. Model bez bilateralnog sporazuma između opskrbljivača i agregatora za središnjim entitetom koji rješava pitanje transfera energije između opskrbljivača i agregatora. Središnji entitet može biti operator prijenosnog ili distribucijskog sustava ili neki treći sudionik koji po reguliranim cijenama posreduje između agregatora i opskrbljivača, odnosno odgovarajućih bilančnih grupa. Određivanje reguliranog iznosa naknade s kojom bi agregator pokrio troškove odstupanja uzrokovane opskrbljivaču odnosno odgovarajućim bilančnim grupama, putem središnjeg entiteta, je iznimno kompleksno pitanje zbog različitih kategorija kupaca, ugovorene cijene za opskrbu električne energije itd. Uvođenje posrednika ili regulatora za rješavanje pitanja naknada između opskrbljivača i agregatora implicira visoki stupanj kompleksnosti za integraciju ovakvog modela. S druge strane, u ovom modelu (slika 3) kupci mogu uživati visoku razinu povjerljivosti jer nisu izravno izloženi razmjeni podataka između opskrbljivača i agregatora.



Slika 3 Model tržišta - bez bilateralnog sporazuma između opskrbljivača i agregatora za središnjim entitetom (prema primjeru iz [12])

Kada bi agregator i opskrbljivač bili dio iste bilančne grupe, tj. kada bi imali sklopljene ugovore s istim kupcima, reducirala bi se kompleksnost ovog pitanja, ali bi to uvelike utjecalo na povjerljivost podataka, konkurentnost, pojavu novih neovisnih agregatora na tržištu itd. Iz prikazanih modela je razvidno da integracija neovisnog agregatora na tržištu električne energije, koji kombinira kratkotrajna opterećenja kupaca električne energije sa sklopljenim ugovorima o opskrbi, nije trivijalna i zahtjeva dodatnu razradu. Primjera radi, prema postojećem regulatornom okviru [10], krajnji kupac koji sudjeluje u programu fleksibilnosti potrošnje, putem neovisnog agregatora, plaća izravno naknadu svom opskrbljivaču koji je pogođen aktivacijom odziva potrošnje, što je oblik prethodno prikazanog Modela 2.

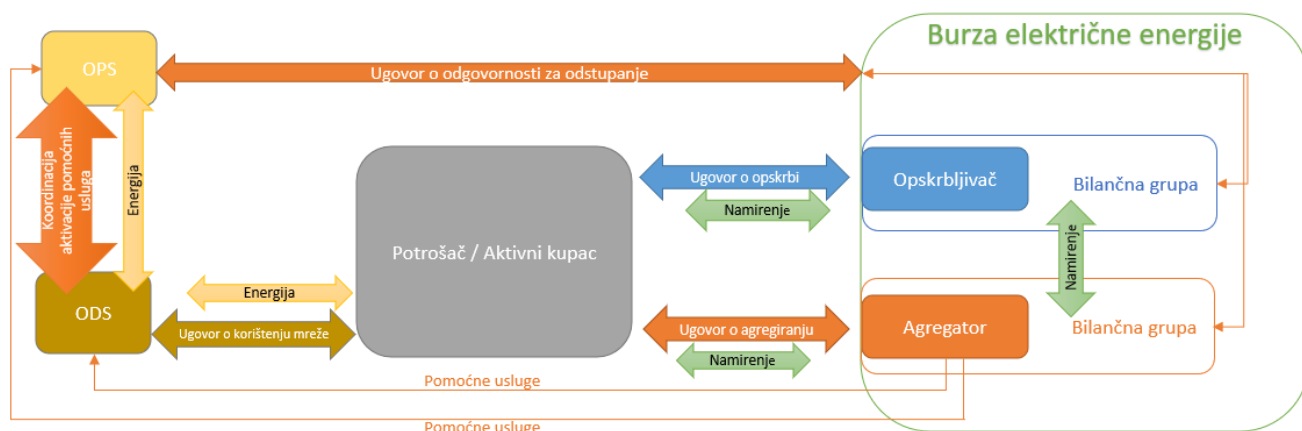
### 2.1.2. Agregator kao pružatelj pomoćnih usluga operatorima sustava

Povećana integracija distribuiranih izvora energije u distribucijsku i prijenosnu mrežu postavlja nove izazove operatorima mreže u osiguravanju stabilne i sigurne opskrbe električnom energijom. Operatori prijenosnog i distribucijskog sustava mogu kroz mehanizme pomoćnih usluga rješavati probleme neuravnoteženja te upravljati zagušenjima u mreži i regulacije napona.

Agregator može nuditi uslugu fleksibilnosti operatorima mreže kroz tržište pomoćnih usluga. Pomoćne usluge su u literaturi definirane kao usluge potrebne za rad prijenosnog i distribucijskog

sustava, a podrazumijevaju usluge uravnoteženja, nefrekvencijske i frekvencijske usluge. Nefrekvencijska usluga je definirana u [10] kao usluga kojom se koristi operator prijenosnog sustava (OPS) ili operator distribucijskog sustava (ODS) u svrhu regulacije napona u stacionarnom stanju, injektiranja brzo djelujuće jalove struje, tromosti za osiguranje stabilnosti lokalne mreže, struje kratkog spoja, sposobnosti crnog starta te sposobnosti otočnog pogona.

Ukoliko agregator fleksibilnosti kombinira kratkotrajna opterećenja kupaca električne energije koji imaju sklopljen ugovor o opskrbi električnom energijom i trguje energijom na tržištu električne energije dan-unaprijed ili unutar-dnevnom i na tržištu pomoćnih usluga mora slijediti neki model kompenzacije prema opskrbljivaču, kao što je prethodno opisano i prikazano na slici 4.



Slika 4 Model tržišta s agregatorom kao pružateljem pomoćnih usluga operatorima sustava

Operatori prijenosne mreže mogu nabavljati pomoćne usluge od agregatora u realnom vremenu u svrhu regulacije napona, rješavanja problema zagušenja u prijenosnoj mreži ili frekvencijskih regulacija. Agregatori su potencijalni kandidati za sudjelovanje na tržištu pomoćnih usluga kao pružatelji rezerve za sekundarnu i tercijarnu regulaciju prema operatorima prijenosnog sustava.

U tercijarnoj regulaciji mFRR (eng. *manual frequency restoration reserve*), kada potražnja za električnom energijom prijeđe prognozirane iznose, operator prijenosnog sustava može angažirati dostupnu rezervu da nadoknadi nedostatak i uravnoteži sustav. Osiguravanje rezerve za uravnoteženje sustava je usluga koju mogu pružiti krajnji kupci s upravljivom potrošnjom, tako da na zahtjev operatora prijenosnog sustava smanje potrošnju u zahtijevanom iznosu s ciljem

uravnoteženja sustava. Jedinice s upravljivom potrošnjom mogu biti bilo koji uređaji čiju je potrošnju moguće smanjiti na nalog operatora prijenosnog sustava, a dio su postrojenja krajnjeg kupca [13] kao na primjer hladnjače, pumpe, kompresori itd. Prema mrežnim pravilima prijenosnog sustava [14] pružatelj usluge mora rezervu snage tercijarne regulacije aktivirati unutar 15 minuta od primljenog poziva. Ako razmatramo pružatelja pomoćnih usluga u pogledu pružanja rezerve sekundarne regulacije, prema aktualnim mrežnim pravilima [14] i ENTSO-E standardima [15], regulacijski opseg za koji pojedina proizvodna jedinica ili postrojenje može tražiti potvrdu sposobnosti je opseg u kojem proizvodna jedinica ili postrojenje može aktivirati snagu unutar 5 minuta.

Regulatorni okvir će zasigurno u budućnosti omogućiti sudjelovanje odziva potrošnje posredstvom agregatora u svrhu primarne FCR (eng. *frequency containment reserve*), koja zahtijeva aktivaciju unutar nekoliko sekundi, i sekundarne regulacije aFRR (eng. *automatic frequency restoration reserve*) prema operatorima prijenosnog sustava ukoliko tehnički preduvjeti budu zadovoljeni. Pravovremena aktivacija fleksibilnosti (operator mreže prema agregatoru) postavlja nove zahtjeve i povećava stupanj složenosti u dinamičkom okruženju operatora mreže.

Operatori distribucijske mreže mogu nabavljati pomoćne usluge od agregatora u svrhu regulacije napona, rješavanja problema zagušenja u distribucijskoj mreži ili rješavanja problema lokalnih neuravnoteženja zbog velikog udjela distribuiranih izvora energije u obliku aktivacije lokalnih spremnika energije posredstvom agregatora. Operator distribucijske mreže mora definirati tehničke uvjete tražene usluge koje potencijalni pružatelj usluge mora zadovoljiti (maksimalna rezerva snage (kW), minimalna rezerva snage (kW), zahtijevano vrijeme za aktivaciju (min), minimalno trajanje aktivacije (min/h), maksimalno trajanje aktivacije (min/h), vrijeme između dvije aktivacije (min/h), maksimalan broj aktivacija (dnevno/mjesečno), utvrditi postupak provjera kvalificiranosti potencijalnih pružatelja usluge odziva potrošnje, utvrditi postupak provedbe natječaja za osiguranje usluge odziva potrošnje, utvrditi kriterije za odabir ponude, način aktivacije, obračun naknade, mehanizam za verifikaciju te prioritetnu listu.

Na razini distribucijskog sustava, iako pomoćne usluge ne mogu biti zamjena za ulaganja u mrežnu infrastrukturu, svakako mogu smanjiti operativne troškove operatorima mreže. Operatori distribucijske mreže moraju definirati tehničke uvjete koje ponuditelj mora zadovoljiti za pružanje

pomoćnih usluga. Potrebni preduvjet za integraciju agregatora kao posrednika između agregiranih izvora fleksibilnosti i operatora mreže je zasigurno uvođenje informacijske-komunikacijske tehnologije za razmjenu, interpretaciju i pohranu podataka.

Važna okosnica za uvođenje agregatora fleksibilnosti u mehanizme pomoćnih usluga prema operatorima mreže je izgradnja platforme za koordinaciju i razmjenu informacija između operatora prijenosnog i distribucijskog sustava. Operator distribucijskog sustava bi trebao imati uvid u raspored planiranih aktivacija fleksibilnosti korisnika mreže, od strane operatora prijenosnog sustava, radi izbjegavanja zagušenja u mreži. Aktivacija fleksibilnosti za rješavanje specifičnog problema u sustavu ne smije negativno utjecati na neki drugi proces (npr. aktivacija sekundarne rezerve od strane OPS-a ne smije dovesti do potrebe za rješavanje problematike zagušenja u mreži od strane ODS-a). Stvaranje zajedničke platforme za trgovanje pomoćnih usluga povećalo bi koordinaciju između zakupljenih usluga, čime bi se zasigurno povećala učinkovitost upravljanja mrežom.

### 2.1.3. Energetske zajednice građana

Aktivni kupci električne energije mogu sudjelovati posredstvom energetske zajednice na tržištu električne energije. Integracija energetske zajednice na tržištu električne energije jedna je od važnijih okosnica za aktivaciju krajnjih potrošača kao punopravnih sudionika elektroenergetskog sustava. Kupcima iz kategorije kućanstva potrebno je omogućiti da sudjeluju u inicijativama energetske zajednice. Motivacije potrošača za aktivaciju upravljive potrošnje unutar ekosustava naprednih mreža mogu biti višestruke (dalje obrađeno u 3.1): visoka cijena električne energije, visoka potreba za energijom iz klimatskih ili drugih razloga, želja za autonomijom, interes za tehnologijom, briga za okoliš, društveni aspekt i sl. [16].

Energetske zajednice građana imaju pravo, unutar svog djelokruga, urediti dijeljenje električne energije koja je proizvedena u proizvodnim jedinicama koje su u vlasništvu zajednice i financijski su odgovorne za neravnoteže koje uzrokuju u elektroenergetskom sustavu, prema Direktivi za unutarnje tržište električne energije (2019/944/EU) [3]. U širem kontekstu, zajednice bi trebale biti sposobne agregirati proizvodnju i potrošnju svojih korisnika odnosno aktivnih kupaca te pozicionirati objedinjenu energiju na organiziranim tržištima električne energije.

U Direktivi o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora 2018/2001/EU [17], energetske zajednice prepoznate su kao zajednice obnovljive energije. Putem lokalnih zajednica obnovljive energije nastoji se potrošačima u kućanstvima koji proizvode, dijele i troše energiju olakšati pristup elektroenergetskom sustavu. Zajednice obnovljive energije mogu proizvoditi, trošiti, skladištiti i prodavati obnovljivu energiju, te dijeliti unutar zajednice energiju iz obnovljivih izvora koja je proizvedena u proizvodnim jedinicama u vlasništvu zajednice te mogu sudjelovati na tržištima energije izravno ili putem agregacije.

Očekuje se od energetske zajednice, koje su prepoznate u direktivama (2019/944/EU) [3] i 2018/2001/EU [17], da imaju važnu ulogu u promociji energetske učinkovitosti i ublažavanju energetske siromaštva. Energetske zajednice bi trebale doprinijeti inovativnim rješenjima u agregiranju proizvodnje i potrošnje na lokalnoj razini. Energetske zajednice su agregatori lokalne proizvodnje i potrošnje koji mogu uspostaviti lokalno tržište razmjene energije i modalitet financijskih kompenzacija između svojih sudionika. Isto tako, trebale bi imati ispunjene uvjete za sudjelovanje na postojećim burzama električne energije ili tržištima pomoćnih usluga.

Prema Direktivi (2019/944/EU) [3], energetskim zajednicama je moguće dodijeliti i pravo upravljanja distribucijskom mrežom tako da postanu operatori distribucijskog sustava ili operatori zatvorenog distribucijskog sustava, ako su za to ispunjeni tehnički i regulatorni uvjeti. Ipak, dodjele statusa ODS-a predstavlja vrlo ambiciozan korak, ali je važno naglasiti da se od energetske zajednice očekuje koordinirano djelovanje s operatorima distribucijskog sustava u svrhu olakšavanja prijenosa energije unutar zajednice. Zaključno, trebalo bi im omogućiti da djeluju na tržištu na temelju ravnopravnih uvjeta bez narušavanja tržišnog natjecanja. Drugim riječima, na energetske zajednice građana trebala bi se primjenjivati ista prava i obveze koji su primjenjivi na ostala elektroenergetska poduzeća, nediskriminacijski i proporcionalno.

## 2.2. Modaliteti aktivacije fleksibilnosti potrošnje kod kupaca električne energije

Pojava novih entiteta na tržištu električne energije daje priliku za aktivaciju fleksibilnosti potrošnje krajnjih korisnika. Odziv potrošnje električne energije, koji se očituje aktivacijom fleksibilnosti, može se ostvariti kroz programe eksplicitnog i implicitnog upravljanja.

Izravno upravljanje trošilima (eng. *direct load control* – DLC) električne energije definira se eksplicitnim odzivom potrošnje [18]. Izravno izvršavanje zahtjeva aktivacije fleksibilnosti potrošnje i njegova isporuka na tržište energije je moguće kroz eksplicitno upravljanje trošilima [19]. Izravno upravljanje trošilima omogućava brz i relativno pouzdan odziv potrošnje u svrhu pružanja pomoćnih usluga operatorima sustava [20], što olakšava integraciju obnovljivih izvora energije, rješavanje lokalnih zagušenja u mreži i slično. Da bi se trošilima moglo upravljati izravno ili putem pristupnika (eng. *gateway*), to zahtijeva infrastrukturu za razmjenu, interpretaciju i pohranu podataka te postavlja nove izazove u smislu informacijsko-komunikacijske tehnologije. Potrebno je osigurati da davatelj zahtjeva može komunicirati s aktuatorom koji mijenja svoju radnu točku na zahtjev, bilo izravnom komandom ili odzivom na postavku neke vrijednosti u sustavu [21].

Implicitni odziv potrošnje je rezultat izloženosti kupaca/potrošača vremenski promjenjivim cijenama električne energije. Kupci električne energije dobrovoljno mijenjaju svoje obrasce korištenja električne energije kao reakciju na cjenovne signale zadržavajući kontrolu nad vlastitim trošilima [19]. Za razliku od eksplicitnog odziva, problematika implicitnog odziva je ta da ga nije moguće izravno verificirati i ovisi o individualnoj spremnosti potrošača na promjenu ponašanja [22]. Implicitni odziv je slabo primjenjiv u svrhu pružanja pomoćnih usluga operatorima sustava koje zahtijevaju brze (unutar nekoliko minuta) i pravovremene aktivacije fleksibilnosti. Primjenjiv poslovni model za implicitni odziv je putem opskrbljivača električne energije, koji uspostavljanjem dinamičkih tarifa mogu poticati svoje kupce na odziv potrošnje [23], ako je tako definirano ugovorom o opskrbi.



Bez obzira na modalitet stimulacije, cilj aktivacije je ispravno usmjeriti i valorizirati dobivenu fleksibilnost na tržištu električne energije. Nacionalni laboratorij Lawrence Berkeley (LBNL) [20, 21] je grupirao vrste odziva potrošnje u četiri osnovne kategorije:

1. oblikovanje (eng. *shape*) - promjena oblika potrošnje;
2. pomicanje (eng. *shift*) - pomicanje potrošnje električne energije u vremenu;
3. rasterećenje (eng. *shed*) - smanjenje opterećenja;
4. i variranje (eng. *shimmy*) - dinamičko podešavanje opterećenja.

Oblikovanje obuhvaća mijenjanje profila opterećenja kupaca električne energije, koje se provodi npr. na poticaj opskrbljivača, kao rezultat izloženosti kupaca dinamičkim tarifama. Odziv potrošnje u svojstvu pomicanja potrošnje električne energije je pogodna usluga za lokalno uravnoteženje proizvodnje i potrošnje, primjerice iz razdoblja u danu kada postoji visoka potrošnja u razdoblje kada postoji višak energije iz obnovljivih izvora ili obrnuto. Rasterećenje je pogodno za eliminaciju vršnih opterećenja u sustavu ili u tercijarnoj regulaciji mFRR. Usluge variranja pogodne su za potrebe brzih aktivacija, poput zahtjeva primarne regulacije FCR i sekundarne regulacije aFRR kako bi se ublažile potrebe za kratkotrajnim povećanjima i smanjivanjima proizvodnje te nastajanje poremećaja.

Odziv potrošnje koji rezultira pomicanjem i variranjem opterećenja nije podoban za ostvarivanje trajnih ušteda energije u krajnjoj potrošnji, ali sudjelovanje u takvim programima aktivacije odziva potrošnje može osigurati dodatan prihod kupcima. Promjena oblika potrošnje (eng. *shape*) ne može zajamčiti uštedu energije. Ukoliko program fleksibilnosti potrošnje kombinira oblikovanje (eng. *shape*) i rasterećenje (eng. *shed*) u oblikovanje-eliminaciju (eng. *shape-shed*) opterećenja te dokazivo ne prouzrokuje tzv. „učinak bumeranga“ (eng. *rebound effect*) povećane potrošnje nakon aktivacije, može doprinijeti osiguravanju energetske uštede. Upravo u tom aspektu je zanimljivo razmotriti potencijalni sinergijski učinak fleksibilnosti potrošnje i energetske uštede.

## 2.3. Praćenje i verifikacija energetske ušteda kroz standardizirane protokole

### 2.3.1. Praćenje i verifikacija mjera energetske učinkovitosti

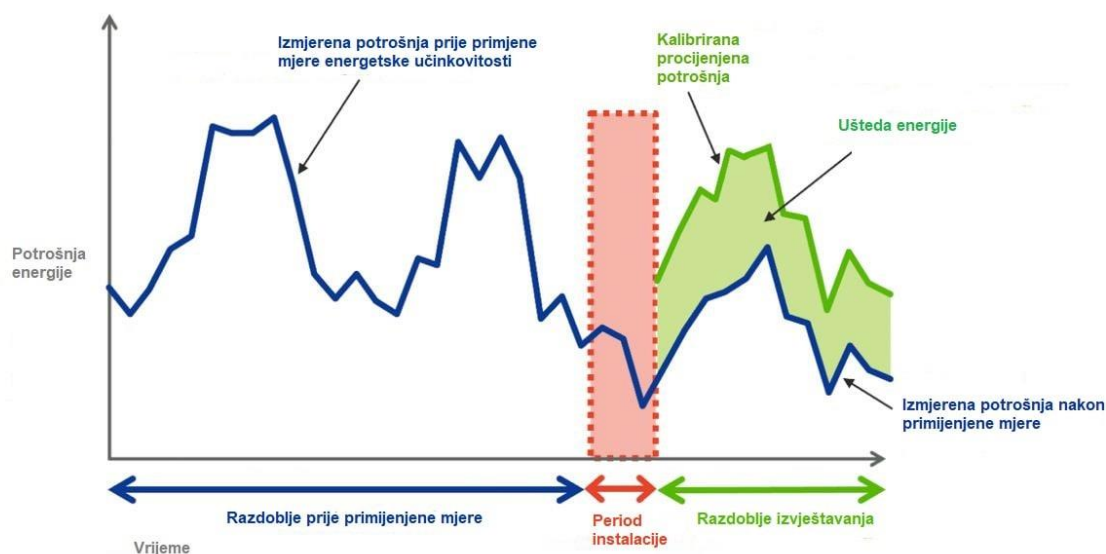
Procedure praćenja i verifikacije imaju široku primjenu, ali se prije svega koriste za praćenje i ocjenu učinka određenih mjera za poboljšanje energetske učinkovitosti [26] i ostvarenja nacionalnih okvirnih ciljeva energetske učinkovitosti [27]. Procedure koje se primjenjuju omogućavaju bolje razumijevanje, upravljanje i raspodjelu rizika u projektima energetske učinkovitosti [28]. Takve procedure podrazumijevaju planiranje, prikupljanje i analizu informacija, kako bi se smanjila nesigurnost u procjeni postignutih energetske ušteda. Tvrtke za pružanje energetske usluga (eng. *energy service company* - ESCO) uobičajeno koriste standardizirane procedure praćenja i verifikacije za definiranje ušteda u sklopu ugovora o energetske učinku (eng. *energy performance contract* - EPC).

Inicijativa za definiciju protokola mjerenja i verifikaciju energetske ušteda započela je 1994. godine od strane nadležnog ministarstva za energetiku (eng. *Department of Energy*) Sjedinjenih Američkih Država (SAD) [29], a rezultirala je izdavanjem prvog Sjevernoameričkog protokola za mjerenje i verifikaciju energije (eng. *North American Energy Measurement and Verification Protocol* - NEMVP) [30] 1996. godine. S obzirom na veliki međunarodni interes i činjenicu da se više od deset zemalja uključilo u razvoj tog protokola, 1997. godine je izdana nova verzija, te je NEMVP preimenovan u međunarodni protokol za mjerenje i verifikaciju učinaka [31] (eng. *International Performance Measurement and Verification Protocol* – IPMVP). Danas je za održavanje i ažuriranje IPMVP-a zadužena neprofitna Organizacija za vrednovanje učinkovitosti (eng. *Efficiency Valuation Organization* - EVO) [31]. Primjena IPMVP protokola preporuča se ESCO tvrtkama [28]. Procedure definiraju smjernice i uobičajenu praksu u mjerenju, računanju i izvještavanju o postignutim uštedama u projektima energetske učinkovitosti kod krajnjih korisnika. Namijenjene su za korištenje stručnjacima, kao osnova za pripremu izvještaja o postignutim učincima. IPMVP protokol zadaje okvir za implementaciju i evaluaciju mjera energetske učinkovitosti i gospodarenja energijom. U sklopu protokola, definirane su mjere očuvanja energije (eng. *Energy conservation measures* – ECM) kao skup mjera za očuvanje energije, poboljšanje učinkovitosti i gospodarenje energijom.

Kako je navedeno u spomenutom protokolu, osnovna karakteristika energetske ušteda je ta da nisu izravno mjerljive. Ušteda energije predstavlja eliminaciju potrošnje koja bi se dogodila u odsutnosti određene mjere, ako primjerice nakon energetske obnove zgrade korisnici troše manje toplinske energije nego prije obnove. Razlika između sadašnje potrošnje koja je izravno mjerljiva i procijenjene potrošnje koja bi se dogodila bez primijenjene mjere predstavlja energetske uštede (slika 5). Razlika između procijenjene potrošnje za izvještajni period i izmjerene potrošnje nakon primijenjene mjere rezultira uštedom te time slijedi opći izraz (1) za praćenje i verifikaciju energetske ušteda:

$$\text{Energetske uštede} = (\text{Procijenjena potrošnja} - \text{Izmjerena potrošnja}) \pm \text{Korekcija} \quad (1)$$

IPMVP protokol daje indikacije o periodu procjene, periodu izvještavanja i metodologiji za kalibraciju odnosno korekciju izračuna. Procijenjene vrijednosti potrošnje potrebno je kontinuirano kalibrirati i prilagođavati promijenjenim uvjetima (klimatski uvjeti, broj osoba u kućanstvu itd.) kako bi bile usporedive s izmjerenim vrijednostima potrošnje. Posebna pažnja posvećena je potrebama za ulaznim mjernim podacima poput ukupne potrošnje čitavog objekta ili dijela objekta te granularnost podataka koja je potrebna za određivanje ušteda.

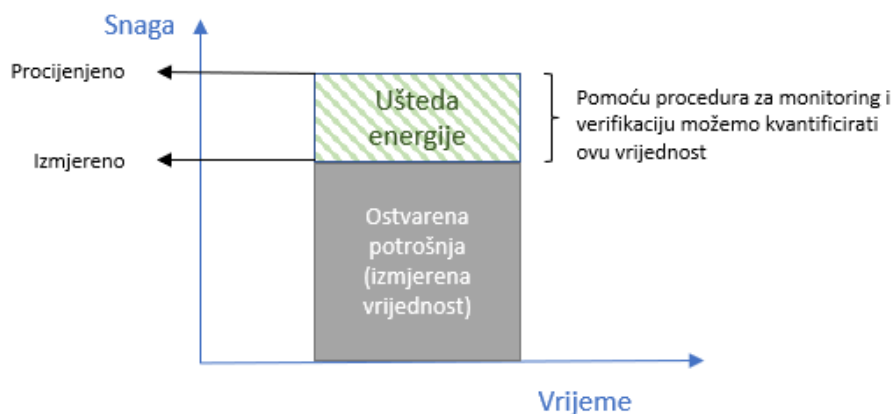


Slika 5 Slikoviti prikaz potrošnje prije i nakon primjene mjera energetske učinkovitosti (prema primjeru iz [31])

### 2.3.2. Praćenje i verifikacija odziva potrošnje

Analogno s opisanim, ako se odziv potrošnje želi valorizirati u aspektu uštede energije, potrebno je koristiti prilagođene procedure za kontinuiranu evaluaciju programa fleksibilnosti potrošnje i ocjenu njegovog učinka. Parametri koji se koriste u svrhu praćenja i verifikacije odziva potrošnje ključni su za određivanje učinka programa fleksibilnosti potrošnje i kvantifikaciju ostvarenih ušteda.

Cilj primjene procedura za praćenje i verifikaciju energetske uštede je kvantificirati uštedu energije, nakon primjene odziva potrošnje (slika 6).



Slika 6 Kvantifikacija fleksibilnosti pomoću procedura za praćenje i verifikaciju unutar jednog sata (prema primjeru iz [32])

Metode koje se koriste za kvantifikaciju procijenjene potrošnje moraju uzeti u obzir varijable poput tipa korisnika odnosno potrošača te i promatranog opterećenja o nezavisnim varijablama (vremenskim i sezonskim uvjetima) i moraju se kontinuirano prilagođavati promjenama. Rezultat međusobne suradnje nadležnog ministarstva za energetiku (eng. *Department of Energy*) Sjedinjenih Američkih Država i Federalne regulatorne komisije za energetiku (eng. *Federal Energy Regulatory Commission - FERC*), je dokument koji je objavljen 2011. godine o mjerenju i verifikaciji odziva potrošnje [32], u sklopu Nacionalnog implementacijskog akcijskog plana za odziv potrošnje (eng. *National Action Plan for Demand Response – NAPDR*). Za izradu

dokumenta bio je zadužen Nacionalni laboratorij Lawrence Berkeley (LBNL), pod pokroviteljstvom nadležnog ministarstva za energetiku (eng. *Department of Energy*) Sjedinjenih Američkih Država. Spomenuti dokument je produkt rada radne skupine zadužene za praćenje i verifikaciju te pragmatično opisuje procedure koje je potrebno pratiti za ispravno uspostavljanje programa fleksibilnosti i kontinuirano praćenje njegovog učinka.

Procedure praćenja i verifikacije koriste se za kvantifikaciju odziva potrošnje u dva konteksta (slika 7):

1. Namirenje - utvrđivanje ušteda energije koje su postigli pojedini sudionici uključeni u program fleksibilnosti potrošnje ili sudionici na veleprodajnom tržištu (agregatori) te odgovarajućih naknada ili penala koji im pripadaju.
2. Procjena učinka - utvrđivanje ušteda na razini programa fleksibilnosti, unaprijed ili unazad, za kalibriranje i evaluaciju programa.



Slika 7 Iterativni proces praćenja i verifikacije odziva potrošnje

Energetske uštede koje su rezultat aktivacije odziva potrošnje kroz program fleksibilnosti potrebno je promatrati u oba konteksta [33]. Namirenja je bitno obuhvatiti i odrediti kroz procese osmišljavanja, planiranja i implementacije programa fleksibilnosti, dok je procjena učinka kontinuirani proces putem kojeg se ispituje i ocjenjuje primijenjeni program.

Rezultati praćenja i verifikacije odziva potrošnje koriste se za utvrđivanje prikladnosti ili sposobnosti resursa koji su angažirani u programima fleksibilnosti potrošnje, određivanje maloprodajnih i veleprodajnih namirenja, predviđanje učinaka pojedinih resursa temeljem njihovih povijesnih performansi, procjenu učinka uspostavljenog programa fleksibilnosti potrošnje, predviđanja i planiranja [32]. Veleprodajna namirenja odnose se na namirenja između agregatora i operatora sustava ili kupca na veleprodajnom tržištu, dok se maloprodajna namirenja odnose na namirenja između agregatora i kupaca električne energije odnosno potrošača.

Za iterativnu kalibraciju programa fleksibilnosti potrošnje potrebno je odrediti učinak programa fleksibilnosti unaprijed (lat. *ex-ante*) i kontinuirano pratiti učinak programa u retrospektivi (lat. *ex-post*). *Ex-post* analize učinka mogu biti dobar temelj za prilagođavanje projekcija primijenjenog programa fleksibilnosti, ali je za to imperativ postojanje odgovarajuće informacijsko-komunikacijske infrastrukture i ispravna semantička interpretacija prenesenih podataka [33].

### **2.4. Poslovni modeli za sinergijsko djelovanje energetske uštede i fleksibilnosti potrošnje**

Energetske zajednice građana nude potrošačima mogućnost izravnog sudjelovanja u proizvodnji, potrošnji i lokalnom dijeljenju energije. Takve inicijative olakšavaju integraciju novih tehnologija i obrazaca potrošnje, ali mogu pomoći u napretku energetske učinkovitosti na razini kućanstava i sprječavanju energetske siromaštva smanjenom potrošnjom energije [17]. Isto vrijedi i za agregatore fleksibilnosti koji su izravno orijentirani na kupce električne energije iz kategorije kućanstva jer mogu doprinijeti istim ciljevima. Poslovni modeli koji omogućavaju sinergijsko djelovanje osiguravanju energetske uštede i aktivacije fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima zanimljivi su za promatranje u ovom kontekstu.

Putem ugovora o energetske učinku (EPC), koji se temelje na ostvarivanju energetske uštede, tvrtka za pružanje energetske usluga (ESCO) implementira projekt za poboljšanje energetske učinkovitosti ili integraciju obnovljivih izvora energije, tako da koristi financijske uštede koje su dobivene od energetske uštede (kao prihod) da bi pokrila investicijske troškove. ESCO tvrtka financira i provodi mjere energetske učinkovitosti kod svojih klijenata i jamči im energetske uštede.

Ukoliko implementirani projekt ne rezultira planiranim energetskim uštedama, ESCO tvrtka ne ostvaruje planirani prihod [34].

Pristup se temelji na prebacivanju tehničkih rizika s klijenta (koji sklapa EPC) na ESCO tvrtku koja garantira energetske uštede, a procedure za procjenu i verifikaciju energetske ušteda temelje se na opisanim protokolima [31] u poglavlju 2.3.1. Jedna od važnijih karakteristika EPC-a je ta da osigurava klijentu (potrošaču električne energije ili korisniku mreže) trajne uštede i nakon isteka ugovora, odnosno izlaskom ESCO tvrtke iz EPC modela financiranja. Postoje dva temeljna modela ugovora o energetskom učinku [34]:

1. Zajamčene uštede – ESCO tvrtka implementira projekt i jamči uštede; ako su uštede veće od zajamčene razine, dijele se između klijenta i ESCO tvrtke, ili ako su manje od zajamčene razine ESCO tvrtka razliku nadoknađuje klijentu;
2. Dijeljene uštede – uštede se dijele između klijenta i ESCO tvrtke prema unaprijed definiranom postotku, ne postoji standardizirana raspodjela jer ovisi o investicijskim troškovima projekta, trajanju, preuzetim rizicima od ESCO tvrtke itd.

Bitna razlika između dva modela je da u slučaju zajamčenih ušteda, jamstvo učinka je količina uštedene energije, dok je jamstvo u slučaju dijeljenih ušteda trošak uštedene energije. U modelu zajamčenih ušteda, ESCO tvrtka preuzima rizike ostvarenja ušteda i tehničke izvedbe projekta, ali ne i kreditni rizik, kojeg snosi klijent koji mora biti kreditno sposoban. Ako se ipak koristi model dijeljenih ušteda, ESCO tvrtka pruža financiranje, preuzima financijske i tehničke rizike izvedbe projekta, ali ne jamči uštede. U modelu dijeljenja ušteda, plaćanje ovisi o trenutnim cijenama energije [35]. S obzirom da model dijeljenja ušteda podrazumijeva da ESCO tvrtka osigurava financiranje projekta energetske učinkovitosti, takav model je manje rasprostranjen od modela zajamčenih ušteda gdje ESCO tvrtka jamči isključivo uštede. Međutim, za veće ESCO tvrtke s većim kapitalom ili diverzificiranim prihodima, model dijeljenih ušteda može biti prihvatljiv.

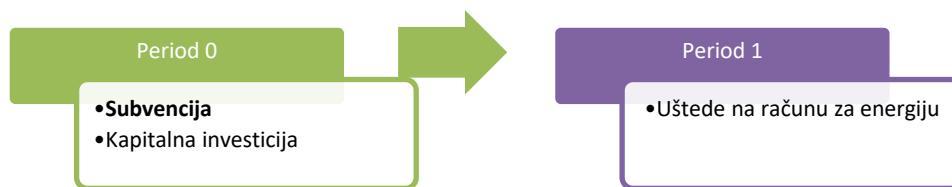
Ugovori o energetskom učinku često nalaze primjenu u projektima obnove industrijskih postrojenja, komercijalnih ili javnih zgrada [36]. Postepena digitalizacija energetskog sektora i sve veća rasprostranjenost sustava za automatizaciju i upravljanje zgrada pružiti će ESCO tvrtkama bolje mogućnosti za prikupljanje i analizu podataka, što također pridonosi boljoj procjeni

energetskih ušteda kroz primjenu informacijsko-komunikacijskih tehnologija i protokola za mjerenje i verifikaciju [35].

U tom kontekstu, financijska shema plaćanja prema učinku (eng. *pay for performance* – P4P) zanimljiva je za praćenje energetske ušteda u neposrednoj potrošnji putem stvarnih izmjerenih podataka. Visina novčanih isplata tvrtke koja nudi P4P uslugu ovisne su o izmjerenim podacima o potrošnji, odnosno normalizacijskim vrijednostima potrošnje energije za pripadajuće vremenske uvjete [37]. P4P shema može olakšati ulaganja u energetske učinkovitost zgrada tako da se pametnim mjerenjem kontinuirano verificiraju uštede energije i transparentno izračuna period povrata investicije. Jedan od važnijih, ali ne i ključnih preuvjeta za uvođenje P4P shema je integracija pametnih (intervalnih) brojlara. Pametni brojlari bi olakšala prikupljanje podataka željene rezolucije putem standardiziranih protokola i omogućila jednostavnije praćenje potrošnje. S obzirom da se potrošnja promatra u odnosu na npr. klimatske parametre, P4P model je potrebno prilagoditi lokalnim uvjetima i karakteristikama potrošnje [37]. Ključan je i odabir odgovarajuće metode za praćenje i verifikaciju energetske ušteda koja se može dinamički kalibrirati prema prikupljenim ulaznim podacima.

Osnovna razlika između klasičnih shema za sufinanciranje projekata energetske učinkovitosti i P4P shema prikazana je na slikama 8 i 9. Kod klasičnih subvencijskih shema, isplata subvencije za postizanje ušteda pomoću resursa energetske učinkovitosti provodi se na početku projekta, najčešće u jednoj isplati. P4P shema osigurava veće i ustrajnije energetske uštede tako da kontinuirano financijski kompenzira resurse energetske učinkovitosti usporednom analizom stvarne i modelirane potrošnje (bez intervencija energetske učinkovitosti). Energetske uštede koriste se kao glavni indikator za učinak projekta energetske učinkovitosti, a isplate se izvršavaju kontinuirano na temelju izračunatih ušteda [38]. Korištenje P4P sheme financiranja projekata energetske učinkovitosti ne implicira nužno potrebu za sklapanjem ugovora o energetskom učinku (EPC). Ako su uštede energije povezane s plaćanjem, to daje veću sigurnost investitorima da će mjere energetske učinkovitosti zaista poboljšati energetski učinak npr. zgrade, odnosno smanjuje im investicijski rizik [39]. Dinamički sustav, koji kontinuirano kalibrira metode koje se koriste za praćenje i verifikaciju energetske ušteda, omogućuje pouzdan izračun postignutih ocjena i minimizira greške u procjeni.



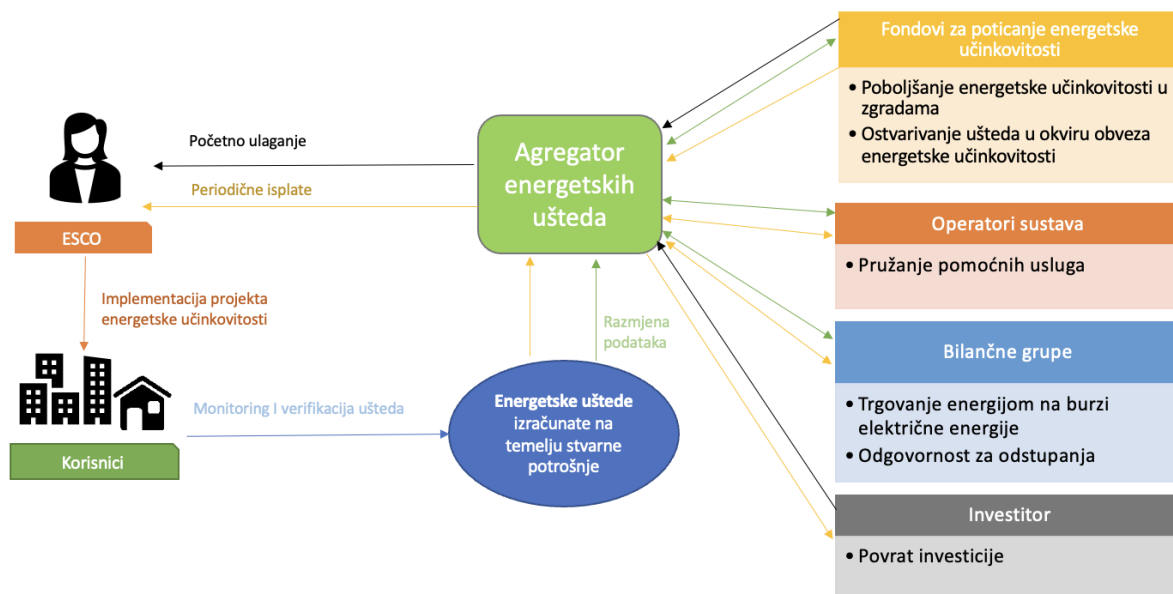


Slika 8 Novčani tok u tradicionalnim subvencijskim shemama (prema primjeru iz [39])



Slika 9 Novčani tok u P4P shemama (korišten primjer iz [39])

Slika 10 prikazuje poslovni model agregatora energetske ušteda, razvijen u okviru istraživačkog projekta i prilagođen europskim uvjetima [40]. Iz prikaza je vidljivo na koji način agregator energetske ušteda djeluje u okviru različitih entiteta (npr. fondovi za poticanje energetske učinkovitosti, privatni investitori, operatori sustava itd.), valorizirajući postignute uštede te kako s njima razmjenjuje sredstva i podatke. Poslovni model agregatora energetske ušteda u okviru P4P sheme temelji se na periodičnim isplatama koje su izračunate na temelju dobivenih ušteda u promatranom vremenskom intervalu. Nije nužno da svi prikazani entiteti sudjeluju u P4P shemi. Što je shema sveobuhvatnija, povećava se složenost P4P programa.



Slika 10 Model agregator energetskih ušteda u okviru P4P sheme

Operator distribucijske mreže mogao bi sudjelovati u P4P shemi sufinanciranjem projekata energetske učinkovitosti korisnicima mreže, putem agregatora energetskih ušteda, kako bi riješio primjerice zagušenja u distribucijskoj mreži ili lokalnih neuravnoteženja zbog velikog udjela distribuiranih izvora.

Agregator ušteda može biti uključen i u mehanizme pomoćnih usluga prema operatorima mreže, ukoliko se energetska ušteda manifestira trajnim rasterećenjem potrošnje u trenucima vršne potrošnje. Cilj je naravno osigurati trajne uštede, ali je kontinuiranim praćenjem potrošnje moguće dodatno valorizirati uštedu kroz aktivaciju fleksibilnosti potrošnje na tržištu energije. Kod P4P shema, gdje se uštede mogu pretočiti u fleksibilnost potrošnje, treba obratiti pozornost i na odstupanja koje kupci električne energije mogu prouzrokovati opskrbljivaču s kojim imaju sklopljen ugovor o opskrbi (više u poglavlju 2.1.1).

Međudjelovanje agregatora fleksibilnosti koji aktivno prati i analizira podatke u potrošnji svojih korisnika kako bi mogao valorizirati njihovu fleksibilnost na tržištu i entiteta koja mora osigurati uštede tim istim korisnicima, otvara prostor za stvaranje novih poslovnih modela u svrhu sinergijskog praćenja energetske uštede i fleksibilnosti potrošnje. Istraživanje [41] iz 2021.

godine. provedeno u SAD-u, sugerira da kombiniranjem mjera energetske učinkovitosti i aktivacijom fleksibilnosti potrošnje u nestambenim zgradama se u najvećoj mjeri pridonosi smanjivanje vršne potrošnje električne energije. Međudjelovanje energetske učinkovitosti i aktivacije fleksibilnosti potrošnje ipak nije najpogodnije za svrhu pomicanja potrošnje (eng. *shift*) zbog nadoknađivanja niskog opterećenja kada je proizvodnja iz obnovljivih izvora najveća [41].

Na tržištu električne energije i kroz mehanizam pomoćnih usluga operatorima sustava, nudi se agregatorima i energetskim zajednicama građana prilika za aktivaciju fleksibilnosti kod kupaca električne energije i stvaranje novih poslovnih modela. Kontinuirana analiza potrošnje u kontekstu aktivacije fleksibilnosti kod kupaca električne energije je u korelaciji sa sustavnim praćenjem energetske ušteda koje agregator ušteda mora verificirati. Procjena učinka projekta energetske učinkovitosti kroz praćenje ušteda i programa fleksibilnosti potrošnje je u tom slučaju kontinuirani proces koji se mora sinergijski pratiti.

### 2.4.1. Obveza ostvarivanja ušteda energije u neposrednoj potrošnji i trgovanje uštedama

Prema Direktivi o energetske učinkovitosti (2018/2002) [2], od zemalja EU-a traži se da ostvare određenu količinu uštede energije i to uspostavom sustava obveza energetske učinkovitosti ili primjenom alternativnih mjera politike.

U okviru sustava obveza, stranke obveznice moraju ostvariti godišnju uštedu od prodane energije krajnjim kupcima. Do 2020. godine, propisana ušteda iznosila je 1,5 % godišnje količine energije koju su stranke obveznice prodale krajnjim kupcima, a za razdoblje od 2021. do 2030. godine taj iznos postavljen je na 0,8 % [2]. Stranke obveznice ušteda su opskrbljivači i/ili distributeri energije [42], odnosno u slučaju električne energije operatori distribucijskog sustava [11].

Nekoliko država članica implementiralo je ili razmatra uvođenje sheme obveza energetske učinkovitosti [43]. Primjerice, u Republici Hrvatskoj, prema važećem zakonu o energetske učinkovitosti [11], stranke obveznice su obvezne ostvarivati uštede energije u neposrednoj potrošnji:

- ulaganjem u poboljšanje energetske učinkovitosti i poticanjem energetske učinkovitosti u neposrednoj potrošnji, i to na način da se ta ulaganja ostvare kao nove uštede energije u skladu s Pravilnikom o sustavu za praćenje mjerenje i verifikaciju ušteda energije [27], ne isključujući ulaganja u opremu za proizvodnju električne energije i samoopskrbu energijom, male i mikrokogeneracije, napredna brojila za očitavanje potrošnje energije kod krajnjih kupaca, odnosno kupaca energije i sva druga ulaganja i poticanja za koje stranka obveznica dokaže novu uštedu,
- kupnjom utvrđenih ušteda energije ili
- uplatom propisane naknade u Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost.

Sustav obveza energetske ušteda obvezuje opskrbljivače i operatore distribucijskog sustava da ostvaruju uštede energije u neposrednoj potrošnji vlastitim ulaganjem ili kupnjom ušteda energije. Mogućnost trgovanja ušteda trebala bi potaknuti razvoj tržišta energetske usluga. Pružatelji energetske usluga (ESCO tvrtke) ili agregator ušteda mogli bi putem projekata energetske učinkovitosti ostvarivati uštede energije, a stranke obveznice bi mogle kupiti te uštede, ukoliko nisu u mogućnosti same provoditi ulaganja.

U Republici Hrvatskoj se za dokazivanje ušteda koristi metoda odozdo-prema-gore (eng. *bottom-up*), propisana u Pravilniku o sustavu za praćenje, mjerenje i verifikaciju ušteda energije [27], a ukoliko neka mjera nije obuhvaćena Pravilnikom stranka obveznica može u izvješću o ostvarenim uštedama dati prijedlog za verificiranje nove uštede uz dostavljanje odgovarajućih dokaza.

Metoda odozdo-prema-gore sastoji se od matematičkih formula za izračun jediničnih ušteda energije (UFES) koje se izražavaju po jedinici relevantnoj za razmatranu mjeru energetske učinkovitosti. Ukupne uštede energije u neposrednoj potrošnji (FES) izračunavaju se množenjem vrijednosti UFES s vrijednosti relevantnog utjecajnog čimbenika u razmatranom razdoblju i zbrajanjem svih pojedinačnih projekata koji su ostvareni u sklopu neke mjere (npr. program poticanja obnove vanjske ovojnice obiteljskih kuća). Izračun UFES temelji se na razlici u specifičnoj potrošnji energije ‘prije’ i ‘poslije’ provedbe mjere poboljšanja energetske učinkovitosti. Ukoliko vrijednost potrošnje energije ‘prije’ ne može biti određena za konkretni projekt, koriste se referentne vrijednosti [44].

Metoda koja se koristi za praćenje i verifikaciju ušteda energije u okviru sheme obveza ostvarivanja ušteda često se temelji na izračunu prema referentnim vrijednostima, a postignute uštede računaju se za svaku promatranu godinu. Odabir metoda za izračun postignutih ušteda kroz primjerice P4P shemu, koje zahtijevaju uspostavu prilagođenih parametara za mjerenje i verifikaciju u dinamičkom okruženju i ne temelje se na izračunima odozdo-prema-gore nisu zakonski regulirane unutar EU. Ako pružatelj energetske usluga u svom portfelju nudi i aktivaciju fleksibilnosti kod svojih korisnika, to se treba razmatrati kao zasebna mjera za postizanje ušteda, pri čemu je nužno da aktivacija fleksibilnosti potrošnje dovodi do rasterećenja odnosno trajnog smanjenja potrošnje energije.

Da bi se fleksibilnost potrošnje mogla uvrstiti kao mjera za ostvarivanje ušteda energije, potrebno je definirati primjenjivu metodologiju za praćenje i verifikaciju postignutih ušteda. Isto tako je neophodno skrenuti pozornost na izbjegavanje dvostrukog obračunavanja ušteda energije, ukoliko je agregator fleksibilnosti ujedno i pružatelj energetske usluga.

Uspostavom sustava trgovanja energetskim uštedama omogućilo bi se novim dionicima na tržištu energije, kao što su agregatori ili energetske zajednice, mogućnost diversifikacije prihoda. Diversifikacija prihoda mogla bi olakšati agregatorima rješavanje problema egzistencije na tržištu električne energije [45]. Sinergijskom prodajom fleksibilnosti potrošnje i energetske ušteda povećava se stupanj složenosti poslovnog modela za agregatora jer zahtjevi za aktivacijom fleksibilnosti od strane operatora distribucijskog sustava mogu biti u cjenovnoj koliziji s ostvarivanjem energetske ušteda. Isto tako, potrebno je regulirati odnose između različitih entiteta, primjerice između opskrbljivača i agregatora odnosno kupaca električne energije. Ako opskrbljivač i agregator imaju sklopljen ugovor s istim kupcima električne energije, a opskrbljivač kupuje uštede od agregatora kako bi zadovoljio potrebe ostvarivanja ušteda, takve odnose je potrebno urediti radi izbjegavanja odstupanja i penalizacije opskrbljivača na tržištu električne energije. Iz navedenih razloga otvara se potreba za kreiranje održivog poslovnog modela koji bi omogućio valorizaciju fleksibilnosti potrošnje u obliku energetske uštede i osigurao dostatnost postignutih ušteda.

### 3. AKTIVACIJA FLEKSIBILNOSTI POTROŠNJE U KUĆANSTVIMA

Fleksibilnost potrošnje i integracija mehanizama za aktivaciju odziva potrošnje ne predstavlja novost u elektroenergetskom sustavu. Prva primjena odziva potrošnje dogodila se 70-tih godina prošlog stoljeća u SAD-u kada se zbog manjka energenata i nemogućnosti sustava da se kroz proizvedenu energiju pokrije potrošnja u mreži moralo posegnuti za nekim novim mehanizmima [46]. Prvi programi fleksibilnosti potrošnje implementirani su pomoću jednosmjernе komunikacije, čime su operatori sustava ili treće strane posredno upravljali trošilima. Povijesno, odziv potrošnje se koristio za potrebe pružanja usluga pouzdanosti EES-u tijekom kritičnih situacija. Kupci električne energije u većim industrijskim postrojenjima ili komercijalnim zgradama su na poziv operatorima mreže isključivali određena trošila u zamjenu za nižu naknadu za električne energije. U programu fleksibilnosti potrošnje koji se provodio u SAD-u, točnije u Kaliforniji, nisu postojali penali, ali ako kupci ne bi smanjili potrošnju na zahtjev, nisu bili nagrađeni s nižom jediničnom cijenom za električnu energiju. Razvojem informacijsko-komunikacijske tehnologije, dvosmjernih komunikacijskih protokola i podatkovnog intenzivnog poslovanja operatora mreže, izravno upravljanje trošilima postalo je izvodljivije.

Danas su mnoge zgrade opremljene sa sustavima za upravljanje energijom i automatizaciju zgrada, koji između ostalog prate potrošnju električne energije u stvarnom vremenu, što ih čini pogodnim kandidatima za sudjelovanje u programima fleksibilnosti potrošnje. Mogućnost aktivacije fleksibilnosti potrošnje prepoznat je kao vrijedan instrument za rasterećenje potrošnje u njenim vršnim trenucima te održavanje sigurnog i pouzdanog elektroenergetskog sustava [47]. Rastuća integracija distribuiranih izvora energije postavlja mnoge izazove operatorima sustava pa su i potrebe za ulaganjem u distribucijsku mrežu na područjima gdje lokalna proizvodnja premašuje potrošnju sve veće [48]. Usluge fleksibilnosti koje jamče sigurnost opskrbe i kvalitetu usluge, a mogle bi smanjiti operativne i/ili investicijske troškove od posebnog su interesa operatorima distribucijskog sustava [49]. Prednost integracije fleksibilnosti potrošnje, kao alat za pružanje pomoćnih usluga operatorima sustava, može biti ekonomska isplativost naspram izgradnje novih elektrana ili instalacije sustava za pohranu energije [50].

Uvođenje naprednih brojlara i mogućnost aktivnog upravljanja potrošnjom postavlja nove izazove u pogledu podatkovno intenzivnog poslovanja za operatore mreže, ali i za same korisnike. U procesu tranzicije prema naprednim i podatkovno intenzivnim naprednim mrežama, mogućnost aktivnog upravljanja potrošnjom postaje sve zanimljivije u pogledu pružanja usluga fleksibilnosti elektroenergetskom sustavu [51]. Tranzicija prema elektroenergetskom sustavu koji zahtijeva dinamičnije upravljanje procesima i mrežom, osim što postavljanja nove tehničke izazove operatorima sustava, otvara mogućnost za integraciju inovativnih rješenja kod krajnjih korisnika [52].

#### **3.1. Motivacijski faktori za uključivanje krajnjih potrošača u programe fleksibilnosti potrošnje**

Strategije koje potiču potrošače na uključivanje u napredni elektroenergetski sustav mogu biti povećanje energetske učinkovitosti, vlastito uravnoteženje (kada je vlastita proizvodnja dostupna) [53], smanjivanje računa za električnu energiju, povećana pouzdanost sustava, smanjena mogućnost poigravanja s tržišnom moći proizvođača električne energije, povećana mogućnost odabira tako da korisnici imaju veću mogućnost upravljanja s troškovima električne energije [54], ekološki i sociološki aspekti [55] itd.

Sudjelovanje krajnjih potrošača ili aktivnih kupaca u programima fleksibilnosti potrošnje može, ali ne mora biti uvjetovano financijskim aspektom. Oba motivacijska faktora mogu biti jednako vrijedna pa moraju biti ravnomjerno podržana adekvatnim strategijama u osmišljavanju, planiranju i implementaciji programa fleksibilnosti potrošnje [56]. Unutar programa koji se temelji na eksplicitnom upravljanju potrošnjom, potrošači bi po potrebi trebali imati pristup vjerodostojnim informacijama kako bi se izbjeglo krivo zaključivanje [57] (npr. zahtjev za aktivacijom fleksibilnosti je u koliziji s niskom maloprodajnom cijenom). Istraživanja su pokazala da limitirajući faktori za uključivanje potrošača u programe fleksibilnosti potrošnje mogu primjerice biti inercija potrošača prema novim prilikama na tržištu, nejasni regulatorni okviri i investicijski troškovi [58]. To ukazuje na potrebu ne samo da se stvori odgovarajući regulatorni okvir za uključivanje potrošača na tržište električne energije, već da se potrošačima omogući prikladna

informiranost kroz primjerice informativne kampanje, koja će im omogućiti jednostavniju tranziciju iz pasivnih u aktivne sudionike elektroenergetskog sustava.

Digitalizacija, kao jedan od glavnih nositelja energetske tranzicije, može imati vrlo snažan utjecaj na angažiranost potrošača u elektroenergetskom sustavu [59] i programima fleksibilnosti potrošnje. Osim digitalizacije, još jedan alat za uvođenje krajnjih korisnika u elektroenergetski sustav je liberalizacija tržišta koja može olakšati pristup tehnologijama šire populacije [60] nižim i pristupačnijim cijenama opreme.

Integracija krajnjih potrošača u elektroenergetski sustav je istovremeno sociološko i tehnološko pitanje. Uvođenje energetske zajednice u elektroenergetskom sustavu je operacionalizacija demokratizacije elektroenergetskog sustava, budući da korisnici sudjeluju u razmjeni, zajedničkoj proizvodnji i skladištenju električne energije [61]. Unutar energetske zajednice aktivni potrošači surađuju s operatorima sustava ili voditeljima bilančnih grupa na tržištu električne energije kako bi optimizirali proizvodnju, distribuciju i potrošnju lokalno proizvedene električne energije u svrhu ostvarenja dobiti samostalno ili putem posrednika (npr. agregatora).

Aktivacija krajnjih potrošača u kućanstvima nije zanemariv izazov energetske tranzicije. U okviru istraživanja [62] analizirane su socijalne, ekonomske i ekološke prilike te rizici sudjelovanja u platformama lokalnih energetske zajednice iz perspektive krajnjih korisnika. Ovisno o primijenjenom poslovnom modelu lokalne energetske zajednice ili lokalnog agregatora fleksibilnosti mijenja se i prioritet za sudjelovanje; primjerice, korisnici koji sudjeluju u poslovnom modelu agregatora koji nudi pomoćne usluge operatorima mreže imaju kao glavni pokretač financijsku dobit; korisnici koji sudjeluju u poslovnom modelu lokalne zajednice koja daje prednost samodostatnosti proizvodnje zainteresirani su za ublažavanje energetske siromaštva u okviru lokalne energetske zajednice i ekološke aspekte. Motivacijski faktori za uključivanje krajnjih potrošača u programe fleksibilnosti potrošnje mogu biti šaroliki, ali održivost poslovnog modela agregatora koji objedinjuje fleksibilnost krajnjih korisnika ovisi o ispravno odabranim strategijama za uključivanje korisnika koje mora ujediniti i ispravno prioritizirati socijalne, ekonomske i ekološke aspekte lokalnih prilika.

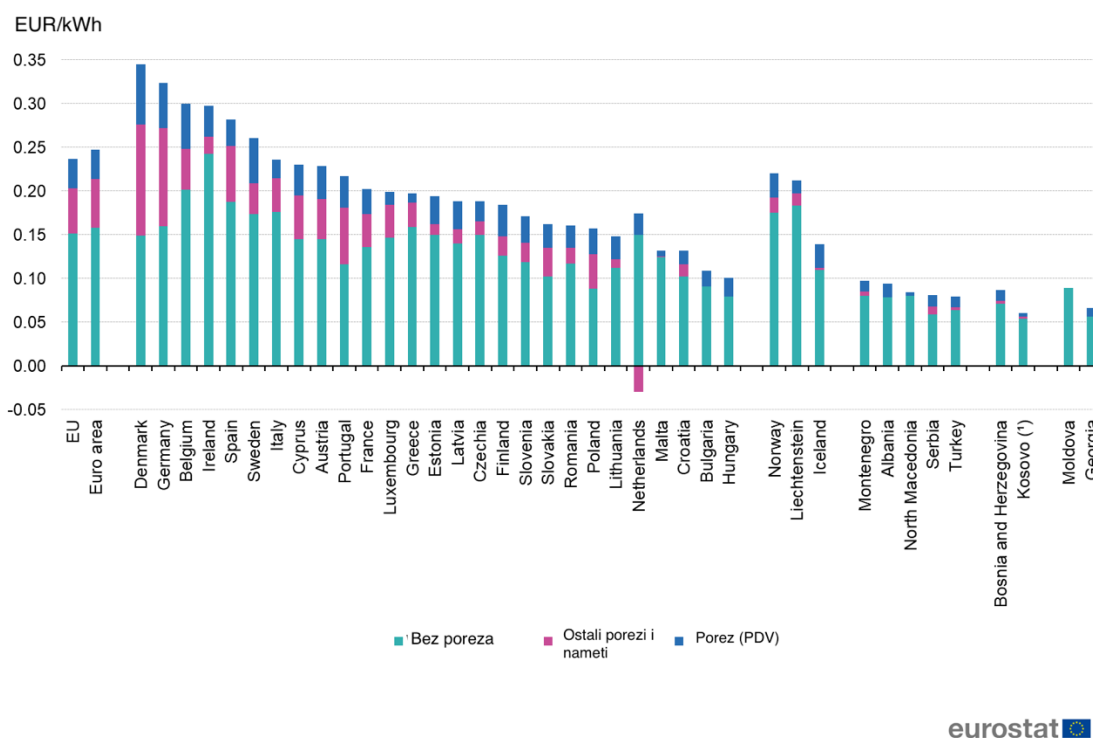


#### 3.1.1. Utjecaj maloprodajnih cijena električne energije na uključivanje aktivnih kupaca u programe fleksibilnosti potrošnje

Jedna od mnogih, ali svakako ne i zanemariva motivacija kupaca električne energije za uključivanje u programe fleksibilnosti potrošnje može biti smanjivanje troškova električne energije. Dinamika kretanja cijena električne energije na maloprodajnom tržištu može zasigurno utjecati na atraktivnost uključivanja kupaca u programe fleksibilnosti potrošnje. Na oblikovanje maloprodajnih cijena električne energije mogu utjecati razni parametri [63], poput dostupnosti energenata, kombinacije izvora energije (eng. *energy mix*), klimatoloških uvjeta, sezonalnosti [64], kapaciteta prijenosnih vodova kojima je EES povezan s drugim državama [65], društveno-ekonomskih uvjeta u određenoj državi, legislative, geopolitičkih odnosa, poreza, naknada i sl. Analiza utjecajnih faktora na maloprodajne cijene električne energije za kućanstva je zahtjevan zadatak, pogotovo ako se promatra u kontekstu tržišnih indikatora pojedine države, poput broja opskrbljivača na tržištu električne energije, udjela velikih proizvođača električne energije na tržištu, investicija u elektroenergetskoj mreži [66], utjecaja pojedine države na regulaciju maloprodajnih cijena itd.

Ako se promatra EU, cijene električne energije za kućanstva značajno variraju između država, kao što je vidljivo na slici 11 u drugom semestru 2021. godine, najveće cijene električne energije za kućanstva imala je Danska s 0,3448 EUR/kWh, Njemačka s 0,3234 EUR/kWh, Belgija s 0,2994 EUR/kWh i Irska s 0,2974 EUR/kWh, dok su najniže cijene zabilježene u Mađarskoj (0,1001 EUR/kWh), Bugarskoj (0,1091 EUR/kWh) i Hrvatskoj (0,1313 EUR/kWh). To bi značilo da su cijene električne energije za potrošače u Danskoj 45.5 %, a u Njemačkoj 36.5 % veće od prosječnih cijena za kućanstva unutar EU. Porezi i ostali nameti na maloprodajnu cijenu električne energije najveći su u Danskoj (56.9 %), gdje postoji konkurencija među opskrbljivačima [67], dok je negativna vrijednost (-3 %) zabilježena u Nizozemskoj zbog porezne olakšice koja se koristi kao alat za prijenos poreznog tereta s kućanstava na ostale kategorije potrošača.

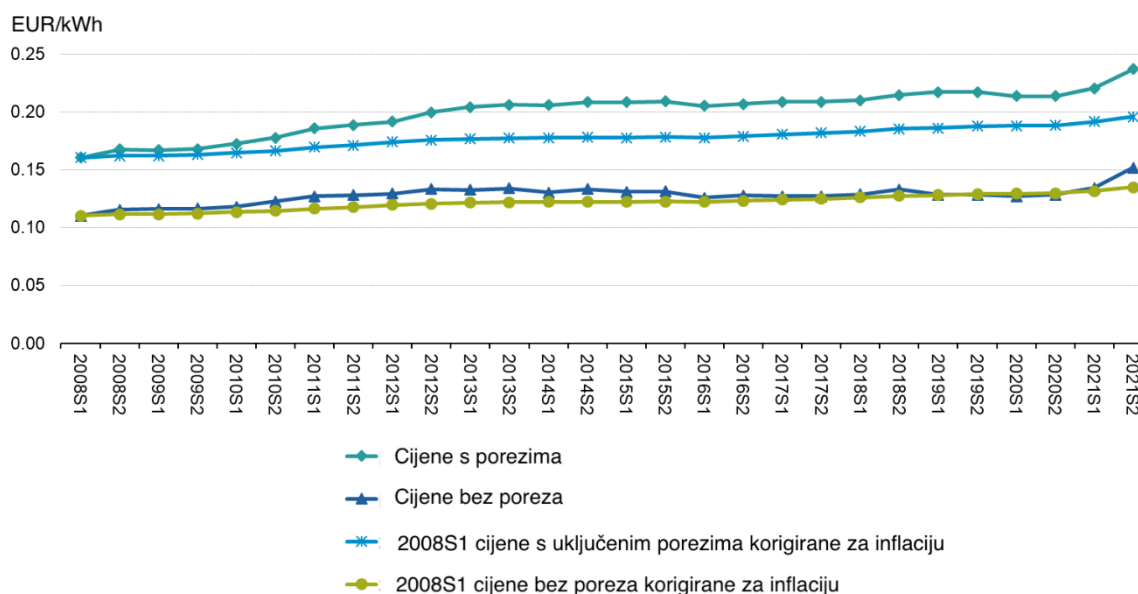
### 3. Aktivacija fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima



Slika 11 Cijene električne energije za kućanstva u drugoj polovici 2021. godine [68]

Razvoj maloprodajnih cijena električne energije od 2008. do kraja 2021. godine prikazan je na slici 12. Trend kretanja maloprodajnih cijena električne energije bez poreza i ostalih naknada, koji obuhvaća naknade za opskrbu, distribuciju i prijenos električne energije, povećavao se brže od stope inflacije sve do drugog semestra 2013. godine, ali je od 2014. do 2019. kretanje bilo relativno stabilno. U drugom semestru 2021. registrirana je najviša cijena električne energije za kućanstva unutar EU od početka praćenja, a udio poreza porastao je za 4.8 postotnih bodova unazad 13 godina, odnosno od 31.2 % u prvom semestru 2008. godine do 36 % u drugom semestru 2021. godine. Ako se promatraju cijene koje su korigirane za inflaciju s uključenim porezima, povećale su se u odnosu na 2008. godinu, dok su cijene bez poreza ostale gotovo na istoj razini kao i 2008. godine. Iz prikaza je razvidno da maloprodajne cijene električne energije za kupce u kategoriji kućanstva imaju rastući trend, što bi značilo da je moguće očekivati dodatni porast cijena u skoroj budućnosti.

### 3. Aktivacija fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima



eurostat 

Slika 12 Dinamika kretanja cijena električne energije u krajnjoj potrošnji [68]

Visok udio poreza i nameta u maloprodajnim cijenama električne energije sprječava potrošače da budu izravno izloženi neizvjesnosti cijena na tržištu, odnosno pozitivno utječu na stabilizaciju cijena. Cijena opskrbe električne energije na maloprodajnom tržištu ne odražava kretanje cijena na veleprodajnom tržištu energije, već se uglavnom radi o subvencioniranim cijenama na razini pojedine države. Ostale naknade, koje ne ulaze u kategoriju poreza uglavnom se odnose na naknade za poticanje obnovljivih izvora energije i sl. Dinamično određivanje cijena, koje bi poticale kupce električne energije na maloprodajnom tržištu na odgađanje ili rasterećenje potrošnje unutar dana morale bi odražavati realno kretanje cijena na veleprodajnom tržištu električne energije, tj. porezi i drugi nameti ne bi smjeli pretjerano utjecati na stabilizaciju cijena.

Ako se promatraju samo niske maloprodajne cijene električne energije, one samostalno nisu poticaj za uključivanje u programe fleksibilnosti potrošnje. Da bi se korisnici cijenama potaknuli na uključivanje u programe fleksibilnosti potrošnje, ili cijene energije moraju biti dovoljno visoke ili mora postojati sustav naknada prema aktivaciji odziva potrošnje koji je reguliran ugovorom. U budućnosti, može se očekivati da će cijene električne energije na maloprodajnom tržištu bolje odražavati dostupnost energenata ili cijena na veleprodajnom tržištu. To će ujedno biti i poticaj za

stvaranje pogodnijeg okruženja za širu primjenu programa fleksibilnosti potrošnje kod kupaca u kategoriji kućanstva.

Agregatori fleksibilnosti ili lokalne energetske zajednice koje se bave aktivacijom fleksibilnosti krajnjih korisnika mogu biti suočeni s problematikom niskih maloprodajnih cijena električne energije. Sustav naknada ili namirenja za aktivaciju fleksibilnosti potrošnje morao bi biti dovoljno privlačan kupcima električne energije, koji su motivirani uglavnom financijskim aspektom, da se uključe u programe fleksibilnosti potrošnje.

### **3.2. Optimizacijski ciljevi za aktivaciju fleksibilnosti potrošnje i ograničavajući parametri**

Sustavi unutar stambenih zgrada poput rasvjete, grijanja, hlađenja i ventilacije mogu mijenjati svoju radnu točku u svrhu ostvarivanja određenih optimizacijskih ciljeva. Fleksibilnost zgrada i aktivnih potrošača unutar zgrada omogućava podešavanje potrošnje prema prethodno definiranim ciljevima [69].

Ovisno o poslovnom modelu entiteta koji se bavi aktivacijom fleksibilnosti potrošnje kod krajnjih kupaca, mijenjaju se i optimizacijski ciljevi. Entitet koji se bavi aktivacijom fleksibilnosti potrošnje koristi neke od prethodno definiranih strategija za uključivanje krajnjih korisnika u programe fleksibilnosti potrošnje. Ako je primjerice opskrbljivač entitet koji potiče fleksibilnost potrošnje kod svojih kupaca, jedna od primjenjivih strategija je poticanje kupaca na fleksibilnost potrošnje putem dinamičkih tarifa. Kupci električne energije u kućanstvima mogu biti uključeni u programe implicitnog upravljanja potrošnjom na način da su izloženi dinamičkim tarifama koje ih potiču na prebacivanje ili odgađanje potrošnje iz određenih perioda unutar dana [70]. Potrošači mogu prilagoditi svoju potrošnju kao odziv na promjenu jediničnih cijena električne energije. Prema empirijskim studijama o vremenski osjetljivim dinamičkim tarifama, prosječno kućanstvo može uštedjeti 10-15 % na računu za električnu energiju [71] ako korisnici prilagođavaju vlastitu potrošnju prema cjenovnim signalima i imaju volje prilagoditi svoje potrošačke navike prema cjenovnim signalima [22]. Dinamičke tarife, odnosno dinamična izmjena jediničnih cijena električne energije, trebale bi reflektirati količinu dostupne električne energije na tržištu tijekom dana. Iz tog razloga, izlaganje potrošača dinamičkim tarifama može biti korisno u svrhu

intenzivnije integracije obnovljivih izvora energije zbog uravnoteženja proizvodnje i potrošnje unutar elektroenergetskog sustava [61].

Ako su zadovoljeni zahtjevi za izravno upravljanje trošilima kroz informacijsko-komunikacijsku infrastrukturu, moguće je eksplicitno upravljanje potrošnjom u svrhu ostvarivanja određenih ciljeva. Eksplicitno upravljanje potrošnjom povoljnije je za integraciju novih entiteta na tržištu energije, primjerice agregatora ili lokalnih energetske zajednice, jer omogućava kupcima s postojećim ugovorom o opskrbi dodatnu zaradu ili smanjivanje troškova električne energije. Pojačana integracija naprednih sustava za automatizaciju unutar kućanstva, pogotovo u kontekstu pametnih zgrada gdje se stupanj naprednosti zgrade može pratiti pomoću indikatora za ocjenjivanje „naprednosti“ (eng. *smart readiness indikator* – SRI) [73], omogućit će jednostavniju provedbu programa izravnog upravljanja kućnim trošilima. U okviru poslovnog modela gdje je agregatoru fleksibilnosti omogućeno izravno upravljanje kućnim trošilima ili putem kućnog pristupnika, potrebno je razmotriti i troškove agregatora koji su neizbježni u cilju ostvarivanja određenih optimizacijskih ciljeva. Riječ je o troškovima integracije infrastrukture za eksplicitno upravljanje potrošnjom, upravljanja podacima, mogućim penalima zbog odstupanja i grešaka u predviđanju opterećenja na tržištu električne energije. Iz tog razloga, međusektorske optimizacije ključne su u svrhu očuvanja održivog poslovnog modela agregatora koja aktivira fleksibilnost kod potrošača električne energije. Održivost poslovnog modela agregatora fleksibilnosti ovisi o tržišnim uvjetima [74], spremnosti potrošača na prihvaćanje novih poslovnih prilika, cijenama električne energije, potencijalu fleksibilnosti lokalnih distribuiranih izvora fleksibilnosti [75], stupnju razvoja tržišta pomoćnih usluga za operatore distribucijskog sustava [76], društveno-ekonomskim faktorima [77], dostupnosti komunikacijsko-informacijske infrastrukture [78] itd.

Može se zaključiti da je poslovni model agregatora koji optimizira prikupljenu fleksibilnost od svojih korisnika u svrhu ostvarivanja tržišnih ciljeva složeno pitanje. U svrhu rješavanja određenih ograničavajućih faktora bitno je razmotriti potencijal agregacije fleksibilnosti lokalnih energetske zajednice koje imaju jedinstvenu priliku za osiguravanje interakcije između svojih članova, jer su članovi vlasnici izvora fleksibilnosti i glavni korisnici agregacije. Mnoga su istraživanja upravo posvećena potencijalu lokalnog tržišta energije za nabavu pomoćnih usluga kao odgovora na zahtjeve operatora distribucijskog sustava [66], tržišta kapaciteta [80], rješavanja lokalnih

zagušenja [75] ili promatranja potencijala fleksibilnosti u okviru dugoročnog planiranja distribucijskog sustava [81]. U promatranim istraživanjima, fleksibilnost potrošnje se ostvaruje oblikovanjem, pomicanjem, rasterećenjem i variranjem opterećenja. U okviru ugovora o energetske učinku (EPC), posredstvom lokalnog agregatora ili ESCO tvrtke, aktivacija fleksibilnosti potrošnje mogla bi se dogoditi i u svrhu ostvarivanja ušteda energije, kao trajno rasterećenje potrošnje [82].

Optimizacijski ciljevi za aktivaciju fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima mogu biti raznovrsni i naizgled međusobno suprotstavljeni, primjerice davanje prednosti vlastitoj potrošnji u odnosu na kreiranje dobiti na tržištu pomoćnih usluga. Cilj koji se često obrađuje u literaturi je smanjivanje troškova električne energije bez utjecaja na komfor [83]. U odnosu na ciljeve, treba promatrati i potencijal pojedinih trošila ili sustava koji se nalaze unutar kućanstava. Na primjer, sustavi rasvjete u kućanstvima nisu pogodni za odgađanje ili pomicanje potrošnje jer bi pomicanje njihovog korištenja u vremenu uvelike utjecalo na ugodu korisnika. Uređaji koji se tradicionalno uzimaju u obzir za eksplicitno upravljanje potrošnjom su rashladni uređaji i zamrzivači, električni grijači vode, električni grijači prostora, perilice rublja, posuđa, sušilice ili dizalice topline. Potencijal fleksibilnosti je posebno izražen u sustavima odnosno procesima u kojima je moguća pretvorba toplinske i električne energije: dizalice topline, klima uređaji, hladnjaci, električni grijači tople vode itd. Toplinska inercija zgrade se često uzima kao pogodan ili ograničavajući parametar u programima fleksibilnosti potrošnje. U svrhu aktivacije fleksibilnosti prema prethodno definiranim optimizacijskim ciljevima, u mnogim slučajevima se koriste parametri toplinske inercije zgrade [84]. Primjenjive su i višekriterijske analize fleksibilnosti [85] kao funkcije karakteristika ovojnice zgrade, ponašanja korisnika i klimatoloških uvjeta unutar kojih se zgrada nalazi. U pogledu osiguravanja energetske ušteda, zanimljiva je korelacija između rada dizalica topline i toplinske inercije same zgrade. U tom segmentu, kao jedan od optimizacijskih ciljeva, moguće je uvrstiti i maksimizaciju energetske ušteda jer poboljšanje energetske svojstava zgrada doprinosi povećanju ušteda u krajnjoj potrošnji [86].

Povećani udio električne energije u krajnjoj potrošnji [87] zgrada može se pridijeliti, između ostalog, većoj rasprostranjenosti sustava za grijanje, ventilaciju i hlađenje (HVAC) [88] koji zahtijevaju određeni stupanj automatizacije. Iako kućanstva danas imaju zasigurno niži stupanj

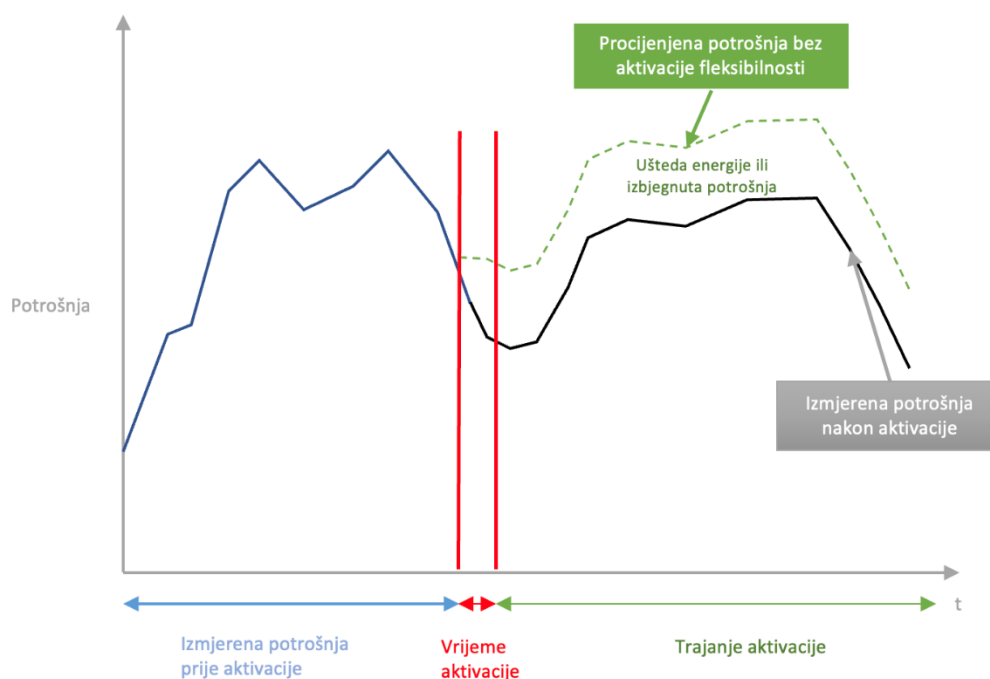
naprednosti (SRI) od primjerice komercijalnih zgrada, koje su opremljenije sustavima za gospodarenje energijom, funkcionalnosti naprednog doma postaju sve pristupačnije korisnicima pa se pojačana automatizacija sustava u kućanstvima može očekivati u skorijoj budućnosti. Veća granularnost mjernih podataka prikupljenih u realnom vremenu putem pametnih (intervalnih) brojlara, senzora za mjerenje temperature, vlage i sl. će zasigurno povećati mogućnosti optimizacije unutar kućanstva ili pametnog doma. Uvođenje odgovarajuće informacijsko-komunikacijske arhitekture za razmjenu, prikupljanje i interpretaciju tih podataka imperativ je za izradu prilagođenih optimizacijskih algoritama koji troškovno-optimalno aktiviraju fleksibilnost kod krajnjih korisnika uz postavljena ograničenja.

### **3.3. Smjernice za procjenu profila potrošnje i njegovu kontinuiranu evaluaciju u programima fleksibilnosti potrošnje**

Uspješna uspostava programa fleksibilnosti potrošnje ukazuje na potrebu za kvalitetnom procjenom profila potrošnje koja omogućava kvantifikaciju fleksibilnosti. Procjena profila potrošnje može se definirati kao potrošnja koja bi se dogodila u odsutnosti aktivacije fleksibilnosti potrošnje [89]. Razlika između procijenjene i izmjerene potrošnje nakon aktivacije fleksibilnosti može rezultirati uštedom energije (slika 13). Slika 13 analogna je slici 5 koja prikazuje energetske uštede; u oba slučaja potrebno je procijeniti potrošnju koja bi se dogodila u odsutnosti primjene mjera energetske učinkovitosti ili aktivacije fleksibilnosti potrošnje.

Temeljna razlika između procjene potrošnje kroz primjenu mjera energetske učinkovitosti i aktivacije fleksibilnosti potrošnje je u različitoj granularnosti podataka i metodama koje se koriste za procjenu. Razlika između ušteta koje nudi agregator fleksibilnosti i tvrtke koja se tradicionalno bavi ostvarivanjem energetske učinkovitosti (ESCO tvrtka) je u trajnosti ušteta. Primjenom određene mjere energetske učinkovitosti, ESCO tvrtka nudi dugoročne uštede, a za verifikaciju tih ušteta obično se koriste podaci niže granularnosti nego li je to slučaj s agregatorom fleksibilnosti koji mora pratiti kratkotrajne aktivacije fleksibilnosti (koje mogu, ali ne moraju rezultirati uštedom). Na održivost poslovnog modela agregatora fleksibilnosti koji nudi svojim korisnicima kratkoročne uštede energije, utječe kvalitetna procjena profila potrošnje njegovih korisnika. S obzirom da uštedu nije moguće izravno izmjeriti, o odabiru vjerodostojne metode za procjenu profila potrošnje

izravno ovisi ispravna kvantifikacija ušteta. Što je bolja kvantifikacija, to je pravedniji sustav namirivanja korisnika za provedenu aktivaciju.



Slika 13 Primjer aktivacije fleksibilnosti potrošnje

Procjene profila potrošnje za potrebe aktivacije fleksibilnosti potrošnje mogu se sistematizirati unutar dva glavna koraka [90]:

1. *Definiranje profila približne potrošnje ili krivulje opterećenja.* Primjenjuju se dvije različite metode: metoda uparivanja sličnog dana (eng. *day matching method*) za procjenu potrošnje istog korisnika temeljem podatka povijesne potrošnje ili regresijska analiza gdje se procjena potrošnje temelji na analizi različitih parametara koji utječu na potrošnju. Alternativno, mogu se koristiti metode koje se temelje na umjetnoj inteligenciji (eng. *artificial intelligence – AI*), ali iste zahtijevaju ispravan odabir podataka s odgovarajućom rezolucijom.
2. *Usklađivanja i kalibracija prve estimacije ili procjene (prvi korak).* Ovaj korak je posebno važan za procjene profila potrošnje koji su izrazito ovisni o vremenskim uvjetima.

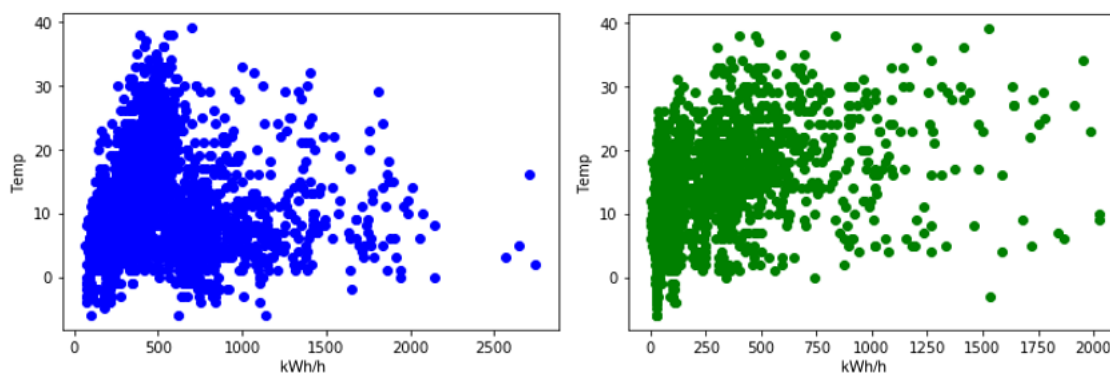


Odabir metoda u prvom i drugom koraku ovisi u najvećoj mjeri o dostupnosti ulaznih podataka i o njihovoj granularnosti. Slijedom, glavne komponente za uspješnu procjenu potrošnje su:

- odabir ulaznih podataka za izračun;
- odabir metode za procjenu potrošnje;
- odabir metode za kalibraciju procjenu potrošnje.

S obzirom da potrošnja ovisi o raznim parametrima, istraživanja su pokazala nisku pouzdanost bilo koje od spomenutih metoda za vrlo promjenjiva opterećenja [91], gdje greške u estimaciji mogu biti iznimno velike. To se primjerice odnosi na potrošnju za koju nije moguće uspostaviti korelaciju između nezavisnih i zavisnih varijabli, odnosno proizvoljnom uključivanju i isključivanju trošila u sustav (npr. perilica, sušilica i sl).

Za bilo koju vrstu korisnika, a poglavito za korisnike u industriji, potrebno je razviti namjensku procjenu potrošnje koja je izravno prilagođena procesima, lokaciji, tipičnim obrascima potrošnje korisnika i sl. Neophodno je ispravno odrediti i posložiti glavne parametre koji utječu na potrošnju i odrediti njihovu međusobnu ovisnost. Na slici 14 prikazan je odnos između tipične potrošnje (s 15-minutnom rezolucijom) dvije komercijalne zgrade koje se nalaze na istoj lokaciji i vanjske temperature. Vidljivo je da ne postoji izravna korelacija između ukupne potrošnje pojedine zgrade i vanjske temperature, što bi značilo da regresijska analiza nije moguća.



Slika 14 Primjer odnosa ukupne potrošnje komercijalne zgrade i vanjske temperature

Potrošnja kućanstva i manjih komercijalnih zgrada je uglavnom podložnija vremenskoj i sezonskoj osjetljivosti, odnosno konzistentnija je ovisnost potrošnje prema nezavisnim varijablama (vremenskim i sezonskim uvjetima).

#### **3.3.1. Standardizirane metode procjene profila potrošnje kroz protokole za praćenje i verifikaciju**

Praćenje standardiziranih procedura za procjenjivanje potrošnje važno je zbog konzistentnosti izračuna. U sklopu dokumenta kojeg je 2008. godine objavio CPUC (eng. *California Public Utilities Commission*), dane su upute za provedbu osnovnih procedura procjene potrošnje u svrhu praćenja i verifikacije energetske uštede. Preporuke su bile usmjerene na korištenje usporednih metoda; npr. prosječna satna potrošnja (kWh) za tri dana s najvećom potrošnjom se reflektirala na prethodnih 10 dana. S obzirom da se na taj način precjenjuje izračunata potrošnja zbog smanjenja pristranosti takvih izračuna kod vremensko-osjetljive procjene potrošnje, predloženo je korištenje kalibracije kao primjerice tzv. „jutarnje usklađivanje“ (eng. *morning-of*) [92]. Takva kalibracija podrazumijeva prilagodbu početne procjene, temeljem satne vremenske prognoze za aktivacijski dan. U tom slučaju, procjena potrošnje provodi se *ex-ante* unutar dva koraka; par dana prije aktivacije, nakon čega se procjena kalibrira unutar istog dana. Kalibracija se može provoditi *ex-ante*, prije aktivacije fleksibilnosti (unutar dana) i/ili *ex-post* nakon aktivacije fleksibilnosti analizom relevantnih parametara. Isto tako, metoda uparivanja sličnog dana (eng. *day matching method*) može se koristiti u *ex-post* procjeni za kontrolu točnosti primjerice regresijske metode; uparivanjem profila potrošnje korisnika koji su imali aktivaciju fleksibilnosti s onima koji nisu, a sličnih su karakteristika.

Istraživanja su pokazala da je za *ex-ante* procjenu metoda uparivanja sličnog dana (eng. *day matching method*) podložna manipulaciji i slabo je primjenjiva u programima fleksibilnosti potrošnje ako se aktivacija prethodno najavi korisnicima [32]. To je posebno primjenjivo na potrošnju koja je izrazito vremenski i sezonalno osjetljiva: korisnici mogu pregrijati prostor kako bi osigurali minimalni utjecaj na komfor prilikom aktivacije fleksibilnosti potrošnje.

Kompleksnost procjena profila potrošnje povećava se sa svakim odabirom u procesu estimacije [89]. Upute za sveobuhvatnu procjenu profila potrošnje, kao temelj za određivanje i kontinuiranu evaluaciju programa fleksibilnosti potrošnje, prikazane su u standardu za praćenje i verifikaciju

odziva potrošnje [32] (NAPDR – vidi poglavlje 2.3.2). NAPDR specificira parametre koji su bitni za ocjenu učinka primijenjene metode:

- „*Prozor procjene*“: opseg povijesnih podataka koji je potreban za procjenu profila potrošnje;
- *Vrsta izračuna*: aritmetička metoda za procjenu profila potrošnje;
- *Točnost uzorkovanja*: granularnost podataka;
- *Pravila isključivanja*: isključivanja povijesnih podataka o potrošnji iz „prozora procjene“, npr. aktivacijski dani, dani s ekstremnim temperaturama;
- *Korekcija procijenjene potrošnje*: s obzirom na razne parametre npr. vanjska temperatura, vlaga, aktivacijski dan za korekciju procijenjene potrošnje na aktivacijski dan;
- „*Korekcijski prozor*“: vremenski period u kojem korigirana procjena potrošnje može biti evaluirana (npr. jedan sat prije aktivacije)

Za evaluaciju učinka programa fleksibilnosti potrošnje putem NAPDR protokola potrebni su i podaci o samoj aktivaciji koji pokrivaju vrstu mjerenja, podatke i metriku koja je korištena za evaluaciju aktivacije fleksibilnosti:

- *Korištenje dvosmjernih komunikacijskih protokola*: ukoliko je relevantno za program, postoji li primjerice agregator koji je zadužen za aktivaciju fleksibilnosti kod krajnjih korisnika;
- *Korištenje mjerenja nakon aktivacije*: ako je relevantno koristiti mjerenje nakon aktivacije za evaluaciju učinka;
- „*Prozor učinka*“: period u kojemu se evaluira učinka resursa za aktivaciju fleksibilnosti potrošnje i
- *Vrsta mjerenja*: aritmetička metoda koja se koristi za provjeru smanjenja potrošnje odnosno ušteda.

Smjernice za praćenje i verifikaciju energetske učinkovitosti prikazane su IPMVP protokolom [31] (vidi 2.3.1). Jedna od važnijih smjernica IPMVP protokola je praćenje ključnih parametara ili indikatora koji utječu na uštedu, što primjerice može biti potrošnja za grijanje prije i nakon

primjene mjera energetske učinkovitosti (poput poboljšanja vanjske ovojnice zgrade). Proceduralni standardizirani protokoli koji su relevantni za izračun ušteda i evaluaciju programa energetske učinkovitosti nisu u potpunosti primjenjivi u programima fleksibilnosti potrošnje koji zahtijevaju drugačiju granularnost ulaznih podataka i dnevnu kalibraciju metoda za procjenu. Metode koje se koriste za definiranje približnih profila potrošnje i njihovu kontinuiranu kalibraciju u svrhu procjene učinka aktivacije fleksibilnosti potrošnje su relevantne i u P4P modelima gdje je potrebno kontinuirano praćenje energetske ušteda i parametrizacija procijenjenih profila potrošnje temeljem utjecajnih faktora.

#### **3.3.2. Nestandardizirane metode procjene profila potrošnje s visokom granularnošću ulaznih podataka**

Ukoliko su korisnici koji sudjeluju u programu fleksibilnosti potrošnje opremljeni intervalnim brojlama, za procjenu njihovih profila potrošnje ili krivulja opterećenja moguće je koristiti metode strojnog učenja. Primjerice, agregator fleksibilnosti nudi operatoru distribucijskog sustava na unutar-dnevnom tržištu pomoćnih usluga agregiranje kratkotrajnih rasterećenja potrošnje svojih korisnika. Granularnost ulaznih podataka koji se obrađuju za procjenu profila opterećenja i projekcije potencijala fleksibilnosti potrošnje mora biti vrlo visoka (rezolucija od 5 minuta ili manje). Metode strojnog učenja poput metode dubokog učenja, linearne regresije, neuronskih mreža, genetskog programiranja trenutno su dostupne za primjenu u svrhu ostvarivanja optimizacijskih ciljeva [93]. Njihova primjena u programima fleksibilnosti potrošnje zanimljiva je jer puno više podataka može obraditi u kraćem vremenu u odnosu na klasične računске metode.

Metode strojnog učenja (eng. *machine learning* – ML) se danas koriste i za procjenu krivulje opterećenja [94]–[96], potrošnje energije u zgradama [97] te, agregirane fleksibilnosti korisnika [98], [99]. Za krivulje opterećenja korisnika u kućanstvima, najbolji učinak su pokazale probabilističke metode [100], [101], dok je Bajesijansko modeliranje (eng. *Bayesian interference*) pogodno za ažuriranje krivulje opterećenja u realnom vremenu [102]. Klasterizacija i grupiranje korisnika kako bi se eliminirala nehomogenost između korisnika su također mogući primjenom metoda strojnog učenja [103].

Metode strojnog učenja pokazuju se kao dobar alat ne samo za estimaciju krivulje opterećenja, već i za kalibraciju procijenjenih profila za kućanstva, primjerice kao *ex-post* metoda za uparivanja

sličnog dana [104]. Također, primjenjuju se i kod uparivanja krivulja opterećenja sličnih karakteristika (unutar iste homogene grupe) s aktivacijom i bez aktivacije fleksibilnosti potrošnje [105], zajedno s metodama za klasterizaciju [106]. Kako bi se smanjila potreba, a i troškovi prikupljanja podataka, moguće je procijeniti opterećenje uparivanjem krivulja opterećenja sličnih korisnika, tako da se podaci iz intervalnog brojila prikupljaju od određenih predstavnika unutar iste grupe i preslikavaju na ostatak homogene grupe.

Primjena metoda strojnog učenja za procjenu profila potrošnje korisnika u kućanstvima koji sudjeluju u programima fleksibilnosti potrošnje predstavlja priliku za aktivaciju potencijala fleksibilnosti manjih korisnika na dan-unaprijed i unutar-dnevnim tržištima. Također, mogućnost njihove primjene daje priliku za kontinuiranu evaluaciju i kalibraciju programa fleksibilnosti potrošnje. Nezaobilazan zahtjev za primjenu tih metoda kroz računske alate je dostupnost ulaznih podataka potrebne granularnosti.

#### **3.4. Prikupljanje i razmjena podataka**

Tradicionalno, programi odziva potrošnje bili su usmjereni na industriju jer su industrijski potrošači imali dovoljno veliku snagu da mogu samostalno sudjelovati u njima. Potencijal promjene opterećenja od nekoliko kilovata za jedno kućanstvo nije bilo dovoljno zanimljivo niti pogodno za sudjelovanje na tržištima energije. Kućanstva su priliku za sudjelovanje u programima odziva potrošnje dobila pojavom agregatora. Agregirana kućanstva mogu imati veći potencijal fleksibilnosti potrošnje od industrije jer su trošila koja posjeduju, kao i načini njihova korištenja, fleksibilnija od industrijskih gdje troškovi prekidanja uobičajenih procesa mogu biti značajni. Međutim, u slučaju većih industrijskih postrojenja i komercijalnih zgrada, aktiviranu fleksibilnost je jednostavnije procijeniti zbog veće količine podataka koje takvi entiteti produciraju.

Uključivanje u programe fleksibilnosti potrošnje je danas dominantno za korisnike u industriji i tercijarnom sektoru (komercijalne zgrade). Iako su zemlje članice EU otvorile pristup inicijativama agregatora i lokalnih energetske zajednice, potencijal fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima još uvijek je značajno neiskorišten. Čak i kada su regulatorni uvjeti zadovoljeni i lokalni agregator može sudjelovati na veleprodajnom tržištu ili tržištu pomoćnih usluga, on nailazi na tehnološke i društveno-ekonomske prepreke, poteškoće uvjetovane dostupnosti ulaznih podataka

sa željenom rezolucijom koji su potrebni za preliminarnu procjenu potencijala fleksibilnosti potrošnje te rješavanju pitanja održivosti poslovnog modela. Riječ je o ograničavajućim faktorima s kojima se suočavaju inicijative oformljivanja lokalnih energetske zajednice za iskorištavanje potencijala fleksibilnosti potrošnje svojih članova.

Primjerice, jedan od značajnijih problema je pravo na pristup mjernim podacima obračunskih mjernih mjesta (OMM). Istraživački pilot projekti koji evaluiraju potencijal agregacije lokalne fleksibilnosti i mogućnosti optimizacije izvora fleksibilnosti, kao npr. odgovor na zahtjeve operatora sustava, analiziraju potencijal aktivacije fleksibilnosti kod korisnika koji su ili već opremljeni intervalnim brojiлом ili je njegova ugradnja predviđena projektom. Lokalni agregator fleksibilnosti, u okviru istraživačkih projekata, uobičajeno ima uvid u mjerne podatke svojih korisnika. Trenutno, u RH, usluga očitavanja (redovno očitavanje) za korisnike mreže kategorije kućanstva podrazumijeva očitavanje brojila električne energije svakih šest mjeseci, a standardnu uslugu očitavanja obavlja operator distribucijskog sustava. Očitavanje obračunskog mjernog mjesta na zahtjev korisnika mreže je nestandardna usluga, što znači da ta usluga predstavlja trošak za korisnika [107]. U budućnosti se očekuje da bi korisnik mreže, koji na svom obračunskom mjernom mjestu ima ugrađeno svoje napredno (intervalno) brojilo, trebao imati pravo pristupa svojim mjernim podacima u gotovo stvarnom vremenu, iako je moguće da se radi o nepotvrđenim mjernim podacima. Ako agregator ima potpisan ugovor s korisnikom mreže ili je korisnik član energetske zajednice, agregator odnosno energetska zajednica trebala bi uz suglasnost korisnika imati pravo pristupa mjernim podacima.

Imperativ za uključivanje kupaca u program aktivnog upravljanja potrošnjom je postojanje tehnološke i komunikacijske infrastrukture unutar kućanstva. Tehnološki zahtjev, koji se odnosi na samu infrastrukturu, uključuje postojanje pametnog (intervalnog) brojila na obračunskom mjernom mjestu kućanstva. Iako je očitavanje brojila djelatnost operatora distribucijskog sustava, pristup verificiranim podacima s brojila u stvarnom vremenu važno je za kalibraciju modela kojeg agregator koristi za estimaciju trenutnog stanja potrošnje. Najveća prednost naprednih brojila (eng. *smart meter*) je mogućnost daljinskog očitavanja. Između ostalog, ugradnjom naprednih brojila koji omogućavaju minimalno 15-minutno očitavanje i spremanje podataka na svakom OMM-u, smanjit će se potreba za izradom nadomjesnih krivulja opterećenja (NKO) za kupce koji nisu opremljeni

pametnim odnosno intervalnim brojilom, ako je izrada NKO-a zakonski prihvatljiva. NKO može zadržati svoju primjenu za nadopunu nedostajućih podataka iz intervalnog očitavanja. Kada je mjerni dio brojila proveden, potrebno je riješiti komunikacijski dio, tj. na koji način povezati brojilo sa sustavom za očitavanje i koji protokol treba koristiti. Trenutno aktualna rješenja (najbolja i potvrđena praksa) temelje se na PLC (eng. *power line carrier*) tehnologijama za urbane sredine i korištenju mobilne mreže za dislocirane lokacije gdje je neisplativa ugradnja PLC-a [108]. Agregator fleksibilnosti može agregirati fleksibilnost svojih kupaca i temeljem očitavanja s intervalnog brojila koji nisu verificirani, ali bi bilo poželjno da u nekom razumnom intervalu raspolaže s verificiranim podacima s brojila dobivenih od operatora distribucijskog sustava.

Integracija naprednih brojila nameće pitanje interoperabilnosti - sposobnosti da brojila i oprema različitih proizvođača mogu komunicirati međusobno, kako iz tehničkih, tako i iz poslovnih razloga. Jedan od primjera za osiguravanje interoperabilnosti je primjena DLMS/COSEM standarda, gdje se svi podaci u elektroničkim mjernim uređajima predstavljaju kroz njihovo mapiranje na adekvatne klase i atributne vrijednosti. Ideja DLMS-a (eng. *Device Language Message Specification*) je pružanje interoperabilne okoline za strukturirano modeliranje i razmjenu izmjerenih podataka, dok COSEM (eng. *COmpanion Specification for Energy Metering*) dodatno uključuje skup specifikacija koje definiraju transportni i aplikacijski sloj DLMS protokola [108].

### **3.5. Informacijsko-komunikacijsko upravljačka arhitektura za eksplicitno upravljanje potrošnjom**

Izravno upravljanje trošilima zahtijeva brzu, pouzdanu, konzistentnu i sigurnu dvosmjernu komunikaciju između različitih sudionika procesa; od proizvodnih objekata preko mrežnih djelatnosti do krajnjih kupaca, koji mogu i biti grupirani kroz koncept agregatora. Funkcionalna standardizirana arhitektura za eksplicitno upravljanje potrošnjom mora omogućiti trošilima (posredstvom kućnog pristupnika ili izravno) razmjenu, interpretaciju i pohranu podataka [21].

Program fleksibilnosti potrošnje, gdje agregator putem eksplicitnog odziva potrošnje izravno upravlja kućnim trošilima svojih korisnika, podrazumijeva da davatelj zahtjeva (agregator) može komunicirati s aktuatorom (kućnim uređajem) koji mijenja svoju radnu točku na zahtjev, bilo izravnom komandom ili kao odziv na postavku neke vrijednosti u sustavu [78]. Osiguravanje

tehničke podloge za aktivaciju fleksibilnosti kod krajnjih korisnika jedan je od postulata za širu proliferaciju eksplicitnog upravljanja potrošnjom kod krajnjih potrošača [109].

Za aktivaciju eksplicitnog upravljanja potrošnjom je važnu ulogu imao razvoj informacijske i komunikacijske tehnologije te protokola koji osiguravaju da pružatelj fleksibilnosti pravovremeno dobije informaciju o aktivaciji, aktivira fleksibilnost bilo smanjenjem ili povećanjem trenutne potrošnje i pošalje izvještaj o izvršenoj aktivaciji. Postojeći komunikacijski modeli koji omogućavaju komunikaciju i upravljanje između korisnika fleksibilnosti i agregatora, komunikaciju između agregatora, kućnog pristupnika i uređaja te semantičku interpretaciju razmijenjenih poruka zanimljivi su za razmatranje u kontekstu eksplicitnog upravljanja potrošnjom koje se dodatno valorizira kao ušteda energije.

#### **3.5.1. OpenADR (Open Automated Demand Response) - IEC 62746**

OpenADR (Open Automated Demand Response) je standard koji je nastao u Sjedinjenim Američkim Državama kroz zajednički istraživački rad nekoliko američkih instituta i kompanija, koje su kasnije osnovale OpenADR Alliance [110]. Međunarodna elektrotehnička komisija (eng. *International Electrotechnical Commission* – IEC) je prihvatila Open Automated Demand Response (OpenADR 2.0b Profile Specification) unutar portfelja IEC standarda [111] i pretočila ga u IEC 62746 [112].

Otvorena specifikacija OpenADR standarda [113] definira implementaciju dvosmjernog signalnog sustava, gdje serveri publiciraju informacije i omogućuju automatskim (strojnim) klijentskim uređajima da se na te informacije pretplate. Standardom su definirani podatkovni modeli te se njime dozvoljava upravljanje izravno određenim resursima poput točno određenog trošila teagregiranim virtualnim resursima koji se sastoje od više pojedinačnih [110].

IEC 62746 ne definira transportne mehanizme; osiguravanje komunikacije „na žici“ van je opsega ovog standarda. Standard podržava HTTP i XMPP kao transportne protokole, poruke po IEC 62746 se kodiraju u XML, što znači da je dodatni teret podatkovnog formata komunikacije razmjerno visok, odnosno implementacija traži razmjerno brze komunikacijske veze [21].

U okviru IEC 62746 (OpenADR), specificirani su sljedeći servisi:

- Registar (eng. *Register*): identifikacija subjekta prije bilo kakve interakcije;



- Događaj (eng. *Event*): glavni tip komunikacije, prenosi informacije o bilo kakvom događaju koji je vezan uz upravljanje potrošnjom;
- Izvještaj (eng. *Report*): vraća periodički ili jednokratni izvještaj o statusu uređaja;
- Prijava (engl. *Opt*): tip servisa kojim virtualni krajnji čvor (eng. *Virtual End Node - VEN*) obavještava virtualnog glavnog čvora (eng. *Virtual Top Node - VTN*) o promjenama u svojoj dostupnosti.

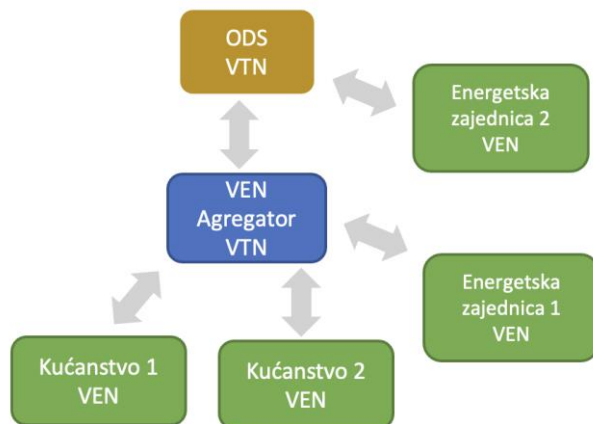
Standard rješava problem potrebe za dvosmjernim signalnim modelom sposobnim za rješavanje komunikacije između operatora sustava, agregatora i krajnjih korisnika. Međutim, minimalni podatkovni model znači kako je semantička interpretacija prenesenih podataka ipak ovisna o implementaciji. Jednostavnije rečeno – VEN može izvještavati, ali što će točno izvještavati ovisi o konkretnoj implementaciji aktivnog upravljanja potrošnjom. Generički tip poruke *Event* u OpenADR traži dodatnu definiciju što takva generička poruka znači. Standard OpenADR definira do dovoljne razine detalja komunikacijsku podlogu, ali za proširenje primjenjivosti interoperabilne platforme za upravljanje potrošnjom potrebna je izgradnja semantičkih ekstenzija za OpenADR. Slično vrijedi i za izvještavanje u OpenADR – tip poruke *Report* definira samo generalno izvještavanje, no ni na koji način ne definira njegovu strukturu [21].

#### 3.5.2. IEC 62939 (Smart Grid User Interface Standard)

Za širi kontekst standarda OpenADR potrebno je djelomično poznavati standard IEC 62939 Smart Grid User Interface Standard [114] koji definira programske servise za simetrično međudjelovanje (eng. *interoperability*) između agregatora i kupaca električne energije. Standard, između ostalog, definira informacijski i komunikacijski model za upravljanje potrošnjom.

Standard IEC 62939 definira koncepte poput virtualnog glavnog čvorišta (eng. *Virtual Top Node - VTN*) i virtualnog krajnjeg čvorišta (eng. *Virtual End Node- VEN*). VEN ima kontrolu nad skupom resursa i procesa, čime može s njima upravljati kada za to prima odgovarajući zahtjev. Primjeri VEN-a su energetska zajednica građana, kućanstvo, proizvođač energije itd. VEN može dvosmjerno komunicirati s „nadređenim“ VTN-om. Važno je naglasiti da svaki fizički dio napredne mreže može u jednom kontekstu biti VTN, a u drugom VEN, tako da je predviđena mogućnost višeslojne hijerarhije [78]. VTN može razmjenjivati poruke s ostatkom napredne mreže

i sa VEN-ovima kojima je „nadređen“ (slika 15). Primjerice, agregator može biti VTN za pojedina trošila u kućanstvima zgrade koji u tom slučaju predstavljaju VEN-ove. Agregator, koji je VTN, može biti VEN kada komunicira s operatorom distribucijskog sustava (ukoliko od njega zaprima zahtjeve za upravljanje potrošnjom).



Slika 15 Koncepti VTN i VEN u kontekstu IEC 62939 i IEC 62746

U okviru IEC 62746, semantička interpretacija prenesenih podataka ovisna je o implementaciji. VEN može izvještavati, ali što će točno izvještavati ovisi o konkretnoj implementaciji aktivnog upravljanja potrošnjom. VTN može tražiti od VEN-ova da reagiraju na cjenovne ponude – implicitno upravljanje potrošnjom. U eksplicitnom upravljanju potrošnjom VTN može naložiti odnosno reakciju VEN-a, ako je VEN registriran kod VTN-a kao dostupan. Jednu i drugu shemu upravljanja potrošnjom te njihove kombinacije moguće je provesti kroz OpenADR odnosno IEC 62746 [112].

### **3.6. Aspekti uspostavljanja poslovnog modela lokalnog agregatora fleksibilnosti potrošnje kućanstva**

Temeljem provedene analize iz prethodnih poglavlja, aspekti uspostavljanja poslovnog modela lokalnog agregatora fleksibilnosti potrošnje kućanstava su sintetizirano prikazani u tablici 1. Aspekti podrazumijevaju rješavanje pitanja regulatornog okvira, ulaznih podataka i njihovu obradu, uspostavljanje tehnološke i komunikacijske infrastrukture, strateški pristup kupcima i rješavanje društveno-ekonomskog aspekta te poslovni i financijski aspekt. Analizirani aspekti pridijeljeni su određenim fazama: inicijalna faza ili procjena izvodljivosti poslovnog modela agregatora, implementacijska faza i kontinuirana evaluacija.

Regulatorni aspekt uspostavljanje reguliranih odnosa između raznih entiteta u EES-u te sudionika u agregaciji potrebno je pratiti u svim fazama.

U fazi ocjene izvodljivosti poslovnog modela lokalnog agregatora fleksibilnosti potrošnje potrebno je prikupiti ulazne podatke i primijeniti metode za ekstrapolaciju iz postojećih ulaznih podataka za početnu procjenu izvedivosti programa fleksibilnosti potrošnje. U implementacijskoj fazi potrebno je prikupljati i obrađivati ulazne podatke o potrošnji i o parametrima koji utječu na potrošnju u željenoj rezoluciji. Za evaluaciju programa fleksibilnosti potrošnje potrebno je prikupljati verificirane podatke o zabilježenoj potrošnji i eventualnim aktivacijama.

Postojanje tehnološke i komunikacijske infrastrukture za razmjenu i prikupljanje podataka nije neophodan u fazi ocjene izvodljivosti, ali je bitan parametar za procjenu početnih troškova. U implementacijskoj fazi nužna je prisutnost odgovarajuće informacijsko-komunikacijske infrastrukture i funkcionalne standardizirane arhitekture za upravljanje potrošnjom. Mogućnost praćenja informacija kroz njihovu semantičku interpretaciju je jedan od ključnih parametara za kontinuiranu evaluaciju programa fleksibilnosti.

Motivacijske aspekte za podizanje interesa kupaca za sudjelovanje u programima fleksibilnosti potrošnje bitno je identificirati u početnoj fazi. U implementacijskoj fazi važno je primijeniti odgovarajuće strategije za podizanje svijesti kupaca te pružati im adekvatnu tehničku i korisničku podršku. Korisnici programa moraju prepoznati dugoročnu korist od sudjelovanja u programu fleksibilnosti potrošnje kroz informativne kampanje i izvještaje o učinku njihovih aktivacija.

U inicijalnoj fazi potrebno je razraditi poslovni model koji je izvodljiv i dugoročno provediv, kada se uzmu u obzir svi ostali aspekti. Učinak apliciranog programa aktivacije fleksibilnosti u odnosu na rješavanje određenih optimizacijskih ciljeva potrebno je kontinuirano pratiti i verificirati.

Tablica 1 Aspekti uspostavljanja poslovnog modela lokalnog agregatora fleksibilnosti potrošnje kroz faze

<i>Aspekti</i>	<i>Faza 0 (Ocjena izvodljivosti)</i>	<i>Faza 1 (Implementacija)</i>	<i>Faza 2 (Evaluacija)</i>
<i>Regulatorni okvir</i>	Postojanje odgovarajućeg regulatornog okvira za aktivaciju fleksibilnosti potrošnje agregiranih kupaca električne energije u kategoriji kućanstava	Trajno	Trajno
<i>Ulazni podaci i obrada podataka</i>	Prikupiti ulazne podatke i primijeniti metode za ekstrapolaciju iz postojećih ulaznih podataka za početnu procjenu izvedivosti programa fleksibilnosti potrošnje	Prikupljanje ulaznih podataka o potrošnji i ključnih parametara koji utječu na potrošnju u željenim rezolucijama te njihova kontinuirana obrada (poglavlje 3.4)  Procjena profila potrošnje odnosno krivulje opterećenja (poglavlje 3.3)	Kontinuirana evaluacija i kalibracija

### 3. Aktivacija fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima

<i>Tehnološka i komunikacijska infrastruktura</i>	<p>Provjera dostupnosti informacijsko-komunikacijske infrastrukture u kućanstvima i preliminarna analiza troškova za instalaciju nove odnosno nadogradnju postojeće</p> <p>Provjera mogućnosti uspostavljanja funkcionalne standardizirane arhitekture za prikupljanje podataka i upravljanje potrošnjom</p>	<p>Kupci/članovi/potrošači opremljeni su odgovarajućom informacijsko-komunikacijskom infrastrukturom (poglavlje 3.4)</p> <p>Postavljanje funkcionalne standardizirane arhitekture za upravljanje potrošnjom (poglavlje 3.5)</p>	<p>Semantička interpretacija podataka</p>
<i>Društveno-ekonomski</i>	<p>Motivirati korisnike na sudjelovanje u programima fleksibilnosti potrošnje primjenom odgovarajućih strategija i istražiti glavne čimbenike koji utječu na potrošnju (poglavlje 3.1)</p>	<p>Aplicirati adekvatne strategije za motiviranje korisnika</p> <p>Kontinuirana korisnička podrška</p>	<p>Dugoročna korist korisnika od sudjelovanja u programima fleksibilnosti potrošnje</p>
<i>Poslovni i financijski</i>	<p>Pronalaženja optimalnih modaliteta za trgovanje agregirane fleksibilnosti na tržištima i postavljanje programa aktivacije fleksibilnosti potrošnje (poglavlja 2.1 i 2.4)</p>	<p>Namirivanje korisnika, trgovanje i optimizacija fleksibilnosti (poglavlje 3.2)</p>	<p>Reprogramiranje programa fleksibilnosti potrošnje</p>

## 4. AGREGIRANJE FLEKSIBILNOSTI KUĆANSTAVA

Za istraživanje mogućnosti uspostave programa fleksibilnosti potrošnje preko lokalnog agregatora koji objedinjava energetske uštede dobivene kratkotrajnim aktivacijama, potrebno je razviti odgovarajući model koji bi omogućio da se s minimalnom količinom dostupnih ulaznih podataka provede takva procjena.

### 4.1. Postojeće metode za procjenu potrošnje i potencijala fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima

U prethodnom poglavlju prikazane su osnovne smjernice za procjenu profila potrošnje kao temelja za uspostavu programa fleksibilnosti potrošnje. S obzirom da je potrebno razmotriti potencijal fleksibilnosti potrošnje kućanstva koji može rezultirati energetskom uštedom, potrebno je promatrati potrošnju uređaja pogodnih za ostvarivanje dugoročnih ušteda energije iliti specifičnosti njihovog opterećenja. U nastavku prikazane su postojeće metode koje se koriste pri procjeni potencijala fleksibilnosti potrošnje pojedinih trošila unutar kućanstva.

#### 4.1.1. Procjena prema podacima iz naprednih brojila

Za procjenu fleksibilnosti pojedinih uređaja koji se nalaze unutar kućanstva i opremljeni su pametnim (intervalnim) brojilima, često korišteni sustavi su nenametljivo praćenje opterećenja (eng. *non-intrusive load monitoring* – NILM) [115] ili nenametljivo praćenje opterećenja trošila (eng. *non-intrusive appliance load monitoring* - NIALM). Takvi sustavi rade na principu praćenja promjena u impedanciji, prepoznavanju promjena aktivne i reaktivne snage te omogućavaju klasterizaciju pojedinih opterećenja [116]. Opterećenja pojedinih trošila unutar ukupne krivulje opterećenja mogu se estimirati pomoću metoda strojnog učenja (eng. *machine learning* - ML) [117].

Metode raščlanjivanja ukupne krivulje opterećenja koja je prikupljena iz naprednih brojila koriste se i za određivanje tzv. „otiska potrošnje“ (eng. *fingerprints*) [118]. Mogućnost analize otisaka potrošnje pojedinih uređaja može biti vrlo važna u procesu odabira uređaja koji su kompatibilni za ostvarivanje određenih optimizacijskih ciljeva. Također, ovisnost potrošnje pojedinih uređaja o vanjskim poticajima i parametrima lakše je time identificirati.

Neminovno je da su podaci prikupljeni iz naprednih brojila važni za procjenu fleksibilnosti kućnih trošila i samih potrošača. Međutim, uvođenje naprednih brojila u kućanstvima provodi se izuzetno sporo [119], pogotovo unutar EU. Jasno je da svi uređaji koji čine ukupno opterećenje kućanstva nisu podjednako podobni za uključivanje u program fleksibilnosti potrošnje. Za bolju procjenu fleksibilnosti, prikupljene podatke iz brojila potrebno je dodatno razraditi i raščlaniti.

Dohvaćanje podataka iz naprednog brojila zahtijeva i pristanak korisnika mreže odnosno potrošača. Propisi o zaštiti osobnih podataka nalažu da korisnik mora dati izričit pristanak za bilo kakvo korištenje tih podataka, što može biti ograničavajuće za samog agregatora koji želi procijeniti inicijalni potencijal fleksibilnosti potrošnje.

### 4.1.2. Procjena prema podacima iz upitnika

U odsutnosti mjernih podataka o potrošnji, specifične profile potrošnje moguće je procijeniti pomoću anketa. Anketama odnosno kvalitativnom analizom moguće je dobiti dobar uvid u vrstu uređaja koje korisnici koriste, opisne karakteristike prostora u kojem obitavaju, uobičajene obrasce potrošnje, broj članova kućanstva i sl. Riječ je o parametrima koji utječu na profile opterećenja pojedinih korisnika.

Nekoliko studija istraživalo je korelaciju između prihoda kućanstva i potrošnje električne energije [120]–[122]. Ekonometrijska analiza potrošnje električne energije u kućanstvima u Portugalu [123] istaknula je da je prihod ključni parametar koji utječe na ukupnu potrošnju. Međutim, taj utjecaj se smanjuje kada se uzmu u obzir varijable kao što su tip zgrade, zauzeće, uređaji i površina. Studija [77] koja pokriva 45 kućanstava u kontinentalnom dijelu Španjolske pokazala je da bi kućanstva s nižim prihodima ili s nižim potencijalom fleksibilnosti zbog geografskih preduvjeta mogla biti isključena iz programa fleksibilnosti potrošnje, što bi povećalo nejednakosti u energetskej tranziciji, koja je snažno orijentirana na fleksibilnost. Taj parametar treba posebno imati u vidu pri povezivanju fleksibilnosti potrošnje s energetskej učinkom zgrade, budući da korisnici s višim prihodima obično imaju više mogućnosti za obnovu zgrade.

U Ujedinjenom Kraljevstvu [124] i SAD-u [125] uočena je pozitivna korelacija između potrošnje električne energije i površine stambenog prostora. U istraživanju koje je provedeno [126] analizirana je korelacija između bihevioralnih, fizičkih i društveno-ekonomskih parametara za

potrošnju energije za hlađenje kućanstva. Pokazalo se da je ponašanje stanara u odnosu na mogućnost odabira najznačajniji problem. Međutim, rezultat sugerira da korisnici koriste klima uređaj u funkciji vanjskih uvjeta (temperature i vremenskih prilika), a ne u funkciji unutarnje temperature.

### 4.2. Nedostaci postojećih metoda

Nedostatak postojećih metoda za procjenu potencijala fleksibilnosti potrošnje je da su striktno orijentirane ili za kvantitativne ulazne podatke, odnosno podatke koji su prikupljeni iz intervalnih brojeva, ili su orijentirane na kvalitativne podatke koji su prikupljeni anketiranjem.

Uočen je nedostatak metoda za grupiranje fragmentiranih izvora fleksibilnosti kućanstava koje bi omogućile:

1. višeslojnu analizu;
2. objedinjenje povijesnih mjerenja i ciljanih podataka prikupljenih izravno od korisnika;
3. kvantifikaciju tako dobivene fleksibilnosti i optimizaciju njene agregirane vrijednosti.

Može se zaključiti da potencijal fleksibilnosti kućanstava još uvijek nije značajno istražen zbog mnogobrojnih razloga:

1. manjak ili nedostatak povijesnih podataka sa željenom rezolucijom;
2. nedostatak informacija o instaliranoj opremi u kućanstvima i niska razina interoperabilnosti;
3. različito ponašanje potrošača na vanjske poticaje;
4. društveno-ekonomski uvjeti potrošača i ulaganja u najsuvremeniju opremu;
5. dostupnost energetske infrastrukture tj. daljinsko grijanje;
6. različitost energetske svojstava zgrada;
7. različiti klimatološki uvjeti, itd.



### 4.3. Praćenje ključnih parametara koji utječu na uštede energije

Povećanjem toplinskog otpora ovojnice zgrade primjenom toplinsko-izolacijskih materijala se poboljšava učinak toplinske izolacije zgrade čime se smanjuje ukupna potreba za energijom zgrade [86]. Korelacija potreba za energijom i toplinskom izolacijom je ključan parametar kod ocjenjivanja elastičnosti fleksibilnosti potrošnje određene zgrade.

Vrijednosti toplinskog otpora ( $R$ -vrijednost) i koeficijenta prolaska topline ( $U$ ) koji je recipročna vrijednost toplinskog otpora ( $1/R$ ) su pojednostavljeni prikazi prijenosa topline komponenta toplinske ovojnice zgrade. Ipak, izračunate vrijednosti  $R$  i  $U$  ne uzimaju u obzir dinamičku komponentu, odnosno izlaganje zgrade varijacijama u korištenju uvjetima okoline kao što je promjenjiva vanjska temperatura i sl. [127].

Zgrade, u ovom kontekstu stambene, mogu biti promatrane kao spremnik za skladištenje topline koji je sposoban apsorbirati, pohraniti i progresivno otpuštati toplinu ovisno o temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog prostora. Takvo načelo je zanimljivo pri uvođenju programa upravljanja potrošnjom u zgradama u kojima je primarni izvor grijanja i hlađenja električna energija. Iako je toplinska inercija zgrada složena tema koja uključuje aspekte korištenja zgrade, ona može biti ključan parametar koji utječe na odgovore (potrošnju) prema različitim vanjskim podražajima. Također, praćenje ključnih parametara koji utječu na potrošnju jedan je od bitnijih imperativa za praćenje i verifikaciju energetske uštede [31].

### 4.4. Studija slučaja

Studija slučaja koja je obuhvaćena u ovom istraživanju uključuje 20 kućanstava (uglavnom samostojeće obiteljske kuće) koja se nalaze na otoku Krku, u Republici Hrvatskoj, i izložena su sličnim klimatskim i vremenskim uvjetima.

Otok Krk, koji je smješten u sjevernom Jadranu, ima umjerenu i blagu mediteransku klimu s prosječnim temperaturama od oko 24 °C ljeti i 9 °C zimi. Krk je posebno zanimljiv jer otočne općine rade na postizanju nulte neto emisije stakleničkih plinova i održivog razvoja [128]. Na otoku nema daljinskog grijanja odnosno toplinske mreže pa je električna energija popularan izvor grijanja i dominantan za hlađenje. Snažna orijentiranost i ovisnost o električnoj energiji za grijanje i

hlađenje čini kućanstva na otoku Krku dobrim kandidatima za sudjelovanje u programima fleksibilnosti potrošnje. Međutim, na ta opterećenja uvelike utječu sezonalnost i vremenski uvjeti, što treba uzeti u obzir pri procjeni njihove dostupnosti tijekom godine.

### 4.5. Metodologija i pristup

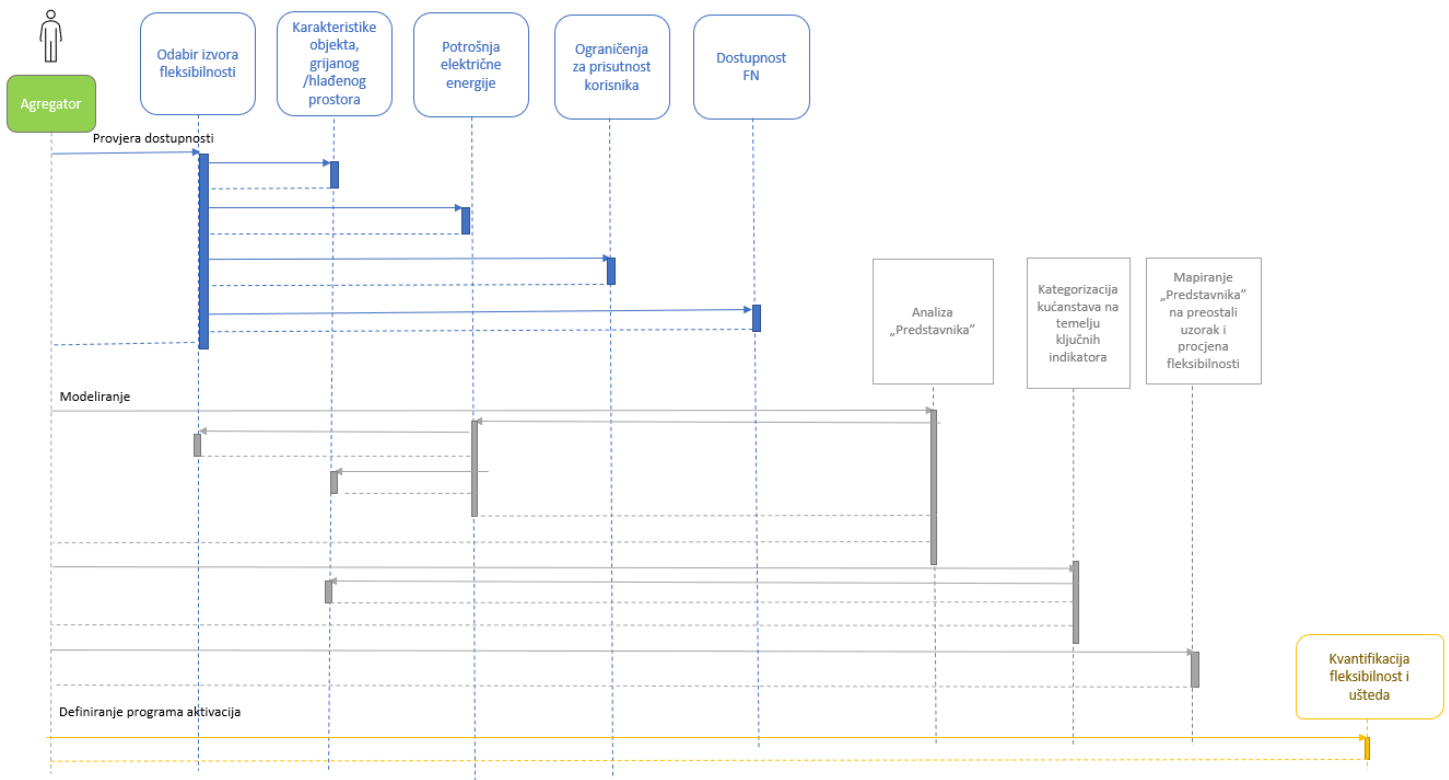
U okviru ove disertacije predložen je model koji omogućava da se kvalitativnom i kvantitativnom *ex-ante* analizom ključnih parametara, koji utječu na potrošnju, procijeni potencijal fleksibilnosti potrošnje agregiranih izvora fleksibilnosti u kućanstvima, koji mogu pridonijeti trajnom rasterećenju potrošnje, tj. uštedama energije.

Uzimajući u obzir različite rezolucije podataka o potrošnji energije prikupljenih u okviru nehomogene skupine potrošača, u sklopu modeliranja fleksibilnosti potrošnje predviđa se mapiranje tipične potrošnje fleksibilnih opterećenja i modeliranje s obzirom na ključne parametre, gdje je to potrebno.

Modeliranje kao temelj za uspostavu programa fleksibilnosti potrošnje podrazumijeva kvantifikaciju fleksibilnosti agregirane potrošnje na temelju algoritama koji identificiraju izvediva rasterećenja tijekom dana za dobivanje energetske ušteda. Na temelju analize zadanog uzorka i identificiranih ključnih parametara, napravljena je simulacija mogućih aktivacija korištenjem Markovljevih lanaca. Model koji je razvijen u sklopu ovog istraživanja (prikazan u [82]) daje mogućnost predviđanja budućih aktivacija odnosno kontinuirane kvantifikacije fleksibilnosti potrošnje i kvantifikaciju tako dobivenih ušteda. Koraci modeliranja agregiranih energetske ušteda kućanstava uz korištenje minimalnog dostupnog skupa ulaznih podataka prikazani su u nastavku.

Sekvencijski dijagram opisanog pristupa prikazan je na slici 16. Modeliranje predviđa pet temeljnih koraka:

1. prikupljanje ulaznih podataka;
2. analiza „predstavnik“ u odnosu na parametre koji utječu na njihovu potrošnju, traženje pravilnosti i određivanje specifične potrošnje;
3. kategorizacija kućanstva na temelju ključnih indikatora;
4. mapiranje „predstavnik“ potrošnje na preostali uzorak za procjenu fleksibilnosti;
5. kvantifikacija fleksibilnosti i ušteda energije.



Slika 16 Sekvenčni dijagram za modeliranje agregiranih energetske ušteda kućanstva uz korištenje minimalnog skupa potrebnih ulaznih podataka

#### 4.5.1. Ulazni podaci

Kako bi se reproduciralo stvarno okruženje u kojemu je profil opterećenja svakog od korisnika izazovno prikupiti, osim javno dostupnih podataka, za potrebe ove analize korišteni su podaci koji su prikupljeni izravno od korisnika putem ankete. Riječ je o podacima očitavanja brojila (na mjesečnoj, polugodišnjoj i godišnjoj razini), zauzeću kućanstva, broju članova kućanstva, tipologiji sustava za grijanje/hlađenje unutar kućanstva, kvalitativni podaci o osnovnim karakteristikama vanjske ovojnice (fasada, prozori, dostupna zasjenjena), površini grijanog i hlađenog prostora, ukupnoj površini, prisustvu vlastite fotonaponske elektrane (FN) i sl.

Prvi korak je prikupljanje ulaznih podataka, tj. ocjena dostupnosti izvora fleksibilnosti koji su prikladni kandidati za rasterećenje potrošnje. To su opterećenja čija se radna točka može ručno ili automatski podešavati (npr. termostatski). Imajući u vidu da u analiziranoj studiji slučaja nema

električnih vozila pa time nema potrebe za njihovo punjenje, a detaljna analiza potencijala uređaja za pripremu tople vode bi zahtijevala složenu procjenu postojećeg stanja, zaključeno je da su najprikladniji izvori fleksibilnosti dizalice topline i klima uređaji zbog njihove mogućnosti podešavanja radne točke. Tablica 2 prikazuje opis kvalitativnih i kvantitativnih podataka koji su prikupljeni za potrebe ovog istraživanja. Detaljni rezultati anketa priloženi su u Pravitku A.

Tablica 2 Sintetizirani opis ulaznih podataka koji su korišteni u istraživanju

<i>Vrsta podataka</i>	<i>Izvor</i>	<i>Jedinica ili kvalitativan podatak</i>
<i>Uređaji koji se koriste za grijanje i hlađenje</i>	Anketa	Dizalica topline, klima uređaj ili dr.
<i>Centraliziran ili decentraliziran sustav grijanja i/ili hlađenja unutar kućanstva</i>	Anketa	Centraliziran, decentraliziran
<i>Povijesna potrošnja kućanstva "predstavnicu"</i>	Računi, samoočitavanja itd.	kWh
<i>Godišnja potrošnja električne energije</i>	Anketa	kWh
<i>Energetsko svojstvo zgrade (samoprocjena)</i>	Anketa	Vrsta fasade, tip prozora, zasjenjenja itd.
<i>Površina grijanog odnosno hlađenog prostora</i>	Anketa	m <sup>2</sup>
<i>Vrsta korisnika</i>	Anketa	Stalni korisnici, sezonalni korisnici
<i>Prosječna temperature, stupanj dana grijanja, stupanj dana hlađenja</i>	meteo.hr [129], timeanddate.com [130], degreedays.net [131]	°C, CDD, HDD
<i>Željena unutrašnja temperature grijanja i hlađenja</i>	Anketa	°C
<i>Mjesečna potrošnja</i>	"Predstavnicu"	kWh
<i>Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za referentne klimatske podatke <math>Q_{H,nd}</math></i>	Pravilnik [132]	kWh/m <sup>2</sup> godišnje
<i>Prisustvo vlastite solarne fotonaponske (FN) elektrane</i>	Anketa	Da, ne

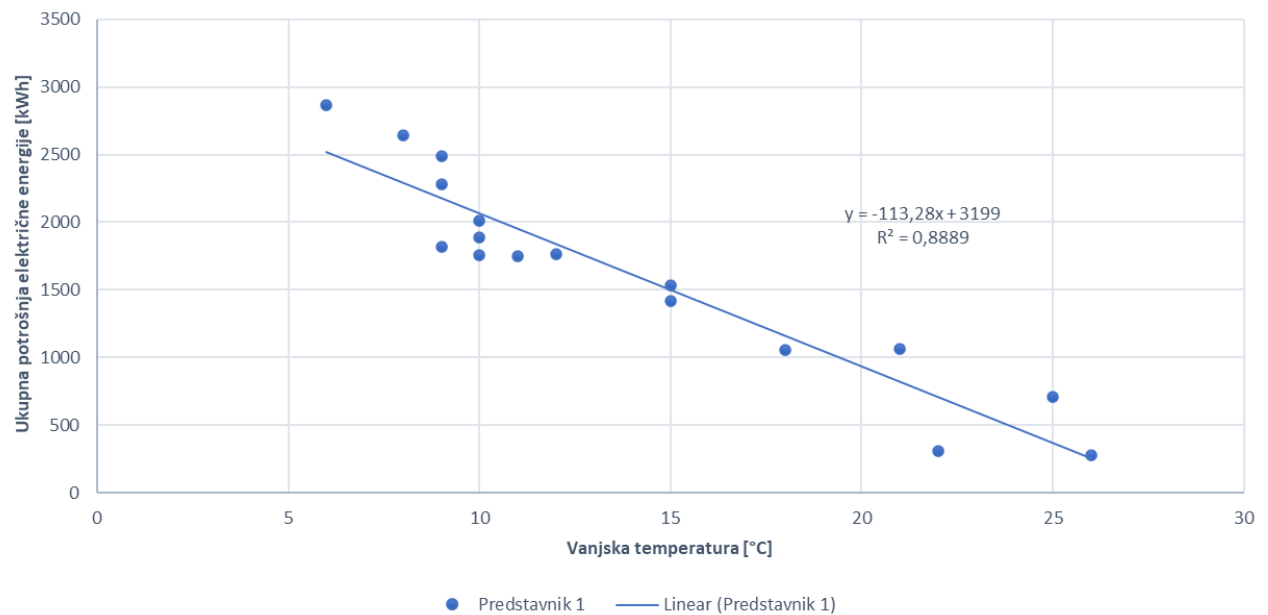
#### 4.5.2. Analiza potrošnje „predstavnik“ i izračun specifične potrošnje za grijanje

Budući da su mjesečni podaci očitavanja ili samoočitavanja potrošnje električne energije dostupni za mali broj korisnika, prvi korak u procesu modeliranja je odabir tzv. „predstavnik“. Riječ je o krajnjim korisnicima koji imaju dostupne mjesečne podatke o potrošnje električne energije i mogu biti korisni za određivanje specifične potrošnje električne energije za grijanje, hlađenje i/ili oboje. Unutar istog uzorka poželjno je izabrati predstavnike tako da po određenim karakteristikama budu izravno usporedivi (slično zauzeće objekta, broj ukućana i slično), ali da se razlikuju primjerice po karakteristikama objekta (vanjska ovojnica zgrade, godina izgradnje i sl). Cilj ovog koraka je ekstrapolirati obrasce potrošnje „predstavnik“ za estimaciju potrošnje preostalih kućanstava unutar uzorka. To podrazumijeva „mapiranje“ specifične potrošnje na preostali uzorak na temelju odabranih kriterija i slične homogene skupine koja je definirana sličnim tehničkim i/ili bihevioralnim ograničenjima. U predmetnom istraživanju, tri kućanstva odabrana su da bi predstavljala tri modaliteta grijanja i hlađenja, kako je opisano u tablici 3.

Tablica 3 Opis "predstavnik" za modeliranje

<i>Modalitet grijanja/hlađenja</i>	
<i>Predstavnik 1</i>	Koristi dizalicu topline samo za grijanje
<i>Predstavnik 2</i>	Koristi dizalicu topline za grijanje i hlađenje
<i>Predstavnik 3</i>	Koristi klima uređaj za hlađenje

Izvori fleksibilnosti koji su pogodni za postizanja ušteda energije su opterećenja osjetljiva na sezonu i vremenske prilike. Na temelju prikupljenih podataka o mjesečnoj potrošnji energije, potrebno je provesti regresijsku analizu varijacija potrošnje u odnosu na vanjske parametre (u ovom slučaju temperaturu). Kao što je prikazano na slici 17, negativan odnos je zabilježen između ukupne mjesečne potrošnje energije (kao zavisna varijabla) i prosječnih vanjskih mjesečnih temperatura (kao nezavisna varijabla) za kućanstvo koje je nastanjeno tijekom cijele godine i koristi isključivo dizalicu topline za potrebe grijanja. Koeficijent determinacije (ili  $R^2$ ) je u ovom slučaju 0,89, što ukazuje na značajnu uzročnost između vanjske temperature i potrošnje energije.

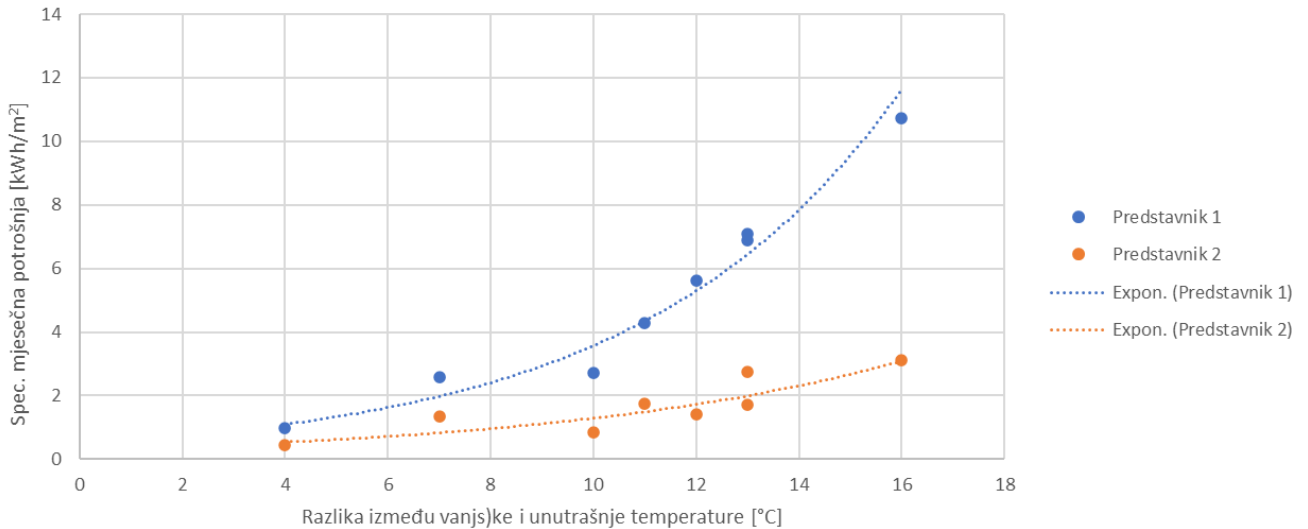


Slika 17 Regresijska analiza ukupne mjesečne potrošnje "predstavnik 1" u odnosu na vanjsku temperaturu

Nakon što je provjerena regresijska ovisnost između vanjskih uvjeta (temperature) i potrošnje energije, sljedeći korak je analiza ovisnosti energetske svojstava različitih zgrada u korelaciji s promjenama vanjske temperature. Često korištena varijabla za izračun potrošnje energije zgrade i energetske učinkovitosti zgrade je stupanj-dan grijanja (eng. *heating degree day* – HDD). Stupanj-dani grijanja (HDD) mjere su koliko (u stupnjevima) i koliko dugo (u danima) je vanjska temperatura zraka bila niža od postavljene unutarnje temperature. Primjerice, ako je osnovna temperatura zgrade 22 °C, a vanjska temperatura zraka 13 °C tijekom osam sati (jedna trećina dana), tada to predstavlja 3 stupnja dana grijanja  $((22-13) \times 1/3 = 3)$ . Postavljanjem željene temperature prosječne temperature, prema podacima iz ankete, i njihove lokacije, preuzeti su podaci za HDD.

U ovom koraku je potrebno analizirati udio mjesečne potrošnje električne energije za grijanje ( $E_{grijanje, TP}$  mjesečno), u ukupnoj potrošnji. Te podatke je potrebno procijeniti jer se uobičajeno ne prikupljaju u praksi, tj. potrebna bi bila ugradnja brojila koje bi izravno prikupljalo podatke o potrošnji sustava za grijanje. Procijenjeni udjeli izračunati su tako da su proporcionalni s HDD vrijednostima za analizirane mjesec unutar godine: listopad (35 %), studeni (48 %), prosinac (61

%), siječanj (73 %), veljača (54 %), ožujak (58 %), travanj (30 %) i svibanj (18 %). Dobivene procijenjene vrijednosti usporedive su s procjenama iz analize [133] koja obuhvaća kućanstva u portugalskoj studiji slučaja.



Slika 18 Usporedna analiza specifične mjesečne potrošnje električne energije za grijanje u odnosu na vanjsku temperaturu

Slika 18 prikazuje značajno odstupanje u potrošnji energije između dviju zgrada tijekom sezone grijanja, što je posebno vidljivo s povećanjem razlike između unutarnje i vanjske temperature. Prikazana odstupanja ukazuju da energetska svojstva zgrade uvelike utječe na potrošnju energije, što je bio očekivani rezultat. U specifičnom slučaju dvaju predstavnika, oba ispitanika koriste automatski postavljenu unutrašnju temperaturu tijekom mjeseci grijanja i stalni su korisnici objekta tako da su izravno usporedivi.

Temeljem procijenjenog udjela potrošnje električne energije za grijanje u promatranim mjesecima, izračunate su sljedeće vrijednosti za predstavnika 1 i 2:

- ukupna električna energija angažirana za grijanje u promatranom mjesecu  $E_{grijanje,TP\ mjesec}$ ;
- specifična električna energija angažirana za grijanje u svakom promatranom mjesecu  $E_{grijanje,TP\ spec\ mjesecno}$  (kWh/m<sup>2</sup>);
- specifična električna energija angažirana za grijanje u promatranom mjesecu  $E_{grijanje,TP\ spec\ godišnje}$  (kWh/m<sup>2</sup>a).

Nakon jasno uspostavljene korelacije između potrošnje električne energije za grijanje i energetskog svojstva zgrade, potrebno je napraviti kategorizaciju kućanstava koja prati taj odnos.

Kako bi se omogućila kategorizacija zgrada iz uzorka temeljem njihovih energetskih svojstava, u nedostatku podataka  $Q_{H,nd}$  iz energetskog pregleda, tu klasifikaciju potrebno je procijeniti temeljem relevantnih ulaznih podataka. Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790 [134], između ostalog, definira korake za izračun specifične potrebe za toplinskom energijom za stambene zgrade u različitim klimatskim uvjetima u RH. Norma propisuje da se pri završetku izračuna specifične godišnje potrebe za toplinskom energijom ( $\text{kWh/m}^2 \text{ a}$ ) za zgradu, dodijeli relevantan energetski razred (A+, A, B, C, D, E, F, G) [132] koji je evidentiran na energetskom certifikatu zgrade. U okviru ovog istraživanja ne provodi se izračun putem algoritma, niti je cilj provesti detaljni energetski pregled zgrade koji podrazumijeva analizu svih parametara koji utječu na energetsko svojstvo zgrade, već se ovi podaci koriste za grubu kategorizaciju zgrada unutar uzorka. U idealnom slučaju, energetski certifikati za svaku zgradu bi bili dostupni, što bi olakšalo ovu analizu i uvelike smanjilo greške procjene i omogućilo bolju parametrizaciju modela. Izračuni koji su napravljeni u prethodnom koraku su specifična godišnja i mjesečna potrošnje električne energije za grijanje  $E_{grijanje,TP \text{ spec mjesečno}}$  ( $\text{kWh/m}^2$ ) i  $E_{grijanje,TP \text{ spec godišnje}}$  ( $\text{kWh/m}^2 \text{ a}$ ), pa je potrebno specifičnu godišnju potrošnju električne energije preračunati u  $Q_{H,nd}$ .

Sezonski faktor grijanja (eng. *seasonal performance factor* - SPF) je pokazatelj koji se koristi za ocjenu učinkovitosti dizalica topline tijekom godine. Predstavlja se kao omjer ukupne topline koju sustav grijanja isporučuje zgradi i električne energije koju tijekom godine koriste dizalica topline i povezani uređaji sustava grijanja [135]. Za potrebe ovog istraživanja korišten je faktor 3 [136], te vrijedi sljedeći izraz (2):

$$Q_{H,nd \text{ godišnje}} = SPF \times E_{grijanje,TP \text{ spec godišnje}} \quad (2)$$

Rezultat prikazuje da je:

- „predstavnik 1“ dodijeljen klasi D i
- „predstavnik 2“ dodijeljena klasi B



što odražava procijenjeno stanje ovojnice dviju zgrada. Korak koji slijedi posvećen je preračunima za dobivanje svih varijanti specifične mjesečne potrošnje električne energije za grijanje prema karakteristikama ovojnice zgrade. Za navedeni proračun korišteni su rasponi između energetske razreda za  $Q_{H,nd}$  (tablica 4), pa je tako dobivena tablica 5.

Tablica 4 Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za referentne klimatske podatke [132]

<i>Energetski razred</i>	<i><math>Q_{H,nd,ref}</math> specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za referentne klimatske podatke (<math>kWh/m^2a</math>)</i>
<b>A+</b>	$\leq 15$
<b>A</b>	$\leq 25$
<b>B</b>	$\leq 50$
<b>C</b>	$\leq 100$
<b>D</b>	$\leq 150$
<b>E</b>	$\leq 200$
<b>F</b>	$\leq 250$
<b>G</b>	$> 250$

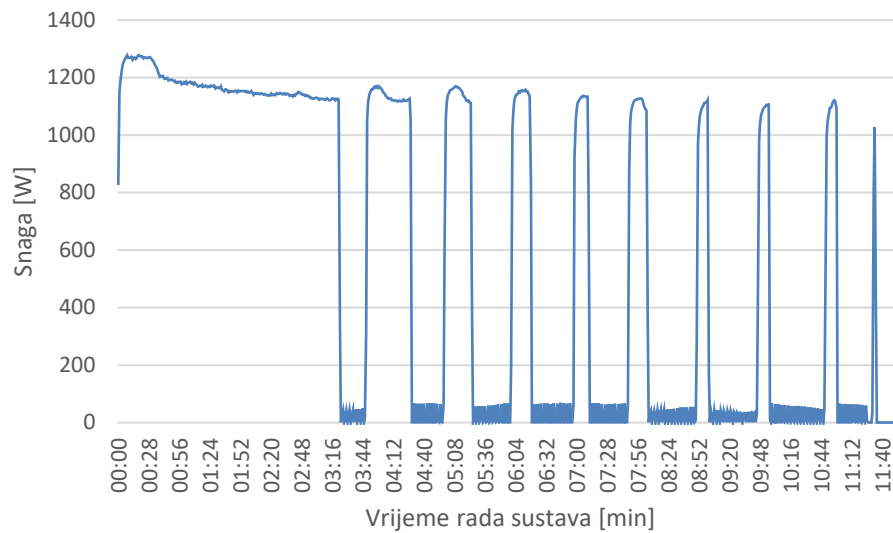
Tablica 5 Modelirana specifična potrošnja električne energije za grijanje u referentnim mjesecima

<i>Specifična potrošnja električne energije za grijanje [<math>kWh/m^2</math>]</i>	<b>A+</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>LISTOPAD</b>	0,26	0,43	0,86	1,72	2,58	3,35
<b>STUDENI</b>	0,43	0,71	1,43	2,85	4,28	5,56
<b>PROSINAC</b>	0,71	1,18	2,37	4,73	7,10	9,23
<b>SIJEČANJ</b>	1,07	1,79	3,58	7,16	10,74	13,96
<b>VELJAČA</b>	0,69	1,15	2,30	4,60	6,90	8,97
<b>OŽUJAK</b>	0,56	0,93	1,87	1,81	5,61	7,29
<b>TRAVANJ</b>	0,27	0,45	0,91	1,81	2,72	3,54
<b>SVIBANJ</b>	0,13	0,22	0,44	0,65	0,98	1,27

U promatranom uzorku, ako se dizalica topline koristi za potrebe grijanja, ona predstavlja jedini izvor toplinske energije u promatranim kućanstvima. Korisnici kućanstva automatski podešavaju željenu unutrašnju temperaturu koja je uglavnom konstantna i na konzistentan način troše električnu energiju za grijanje. Slijedom toga, moguće je odrediti specifične potrošnje električne energije za zgrade s obzirom na različita energetska svojstva.

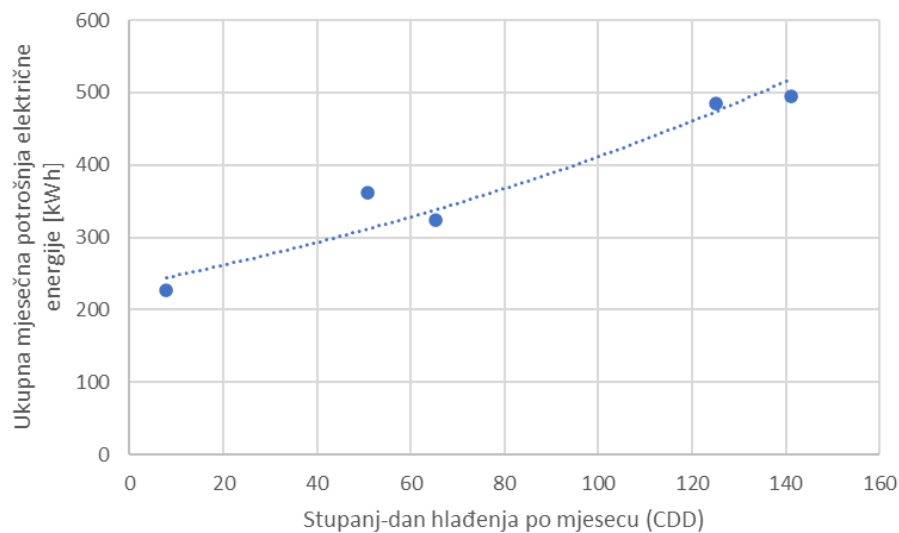
Na slici 19 prikazan je tipičan rad rashladnih klima uređaja unutar 12 sati. Nakon paljenja sustava, kompresor radi onoliko dugo koliko je potrebno da se unutrašnja temperatura zraka ne spusti na željeni iznos (gornja vrijednost koja se kreće oko 1,15 kW). Nakon postizanja željene temperature koja mu je postavljena, kompresor se povremeno pali i gasi kako bi održao unutrašnju temperaturu prostora na željenom iznosu. Osim kompresora, ventilator se povremeno pali i gasi da bi omogućio cirkulaciju zraka ili nekog drugog medija. Mjerenje [137] je provedeno na uređaju ugrađenom u kućanstvu i prikazuje rad klima uređaja tijekom noći, dok vanjska temperatura pada. Također, moguće je zaključiti da je maksimalna snaga pogona ventilatora relativno male vrijednosti i zanemariva je u kumulativnoj potrošnji električne energije po kućanstvu.

Dizalice topline koje se koriste za grijanje rade na isto principu kao klima (rashladni) uređaji i hladnjaci, ali se toplinska energija ne predaje okolišu već se oduzima od njega. Unutrašnjost grijane prostorije je rashladni spremnik, a ogrjevni medij može biti vanjski zrak, tlo ili voda. Dizalice topline koje se obično koriste u primorskoj Hrvatskoj su one koje za ogrjev koriste vanjski zrak. Potrošnja električne energije ovih uređaja je, kao i u slučaju klima (rashladnih) uređaja, određena parametrima kompresora.



Slika 19 Potrošnja klima uređaja unutar 12 sati rada [izvor: [137]]

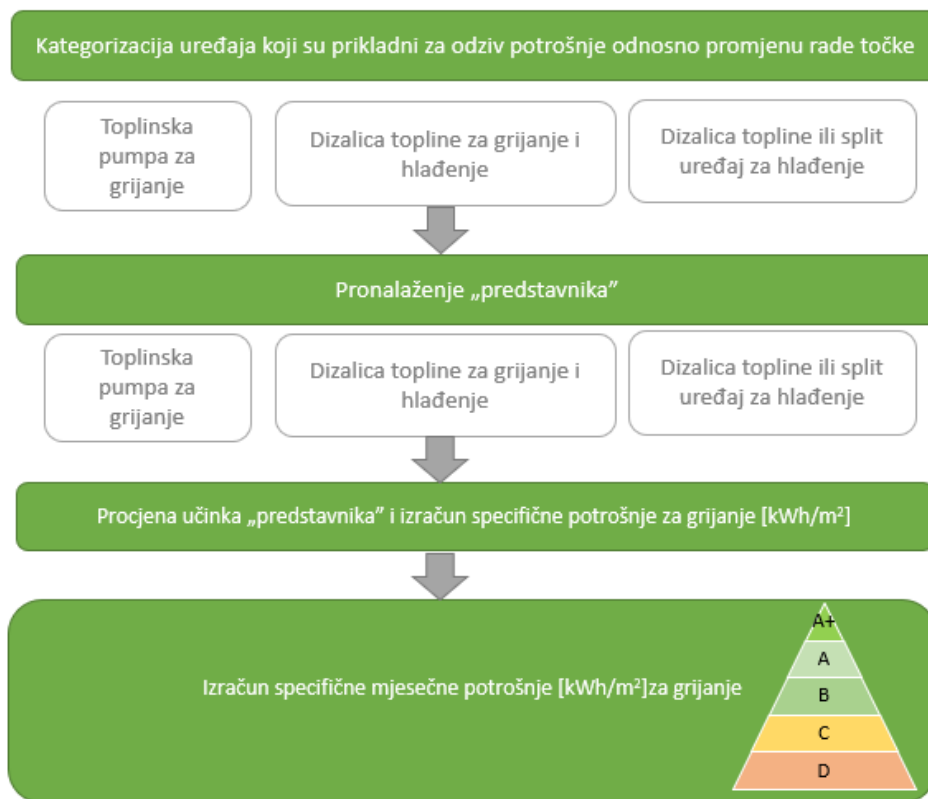
S obzirom da je energija  $E = \int_{T_1}^{T_2} P(t) dt$ , ako je  $P_{el\ kompresor}$  snaga kompresora relativno konstantna, varijabla koja s mijenja i najviše utječe na ukupnu potrošnju električne energije je aktivno vrijeme rada kompresora, koje će u daljnjem tekstu biti definirano kao  $t_{rad\ sustava}$ .



Slika 20 Analiza odnosa ukupne potrošnje električne energije "predstavnik 3" i CDD

Analizom potrošnje „predstavnik 3“ uočena je pozitivna korelacija između ukupne potrošnje električne energije i stupanj-dana hlađenja (CDD), koji označavaju koliko (u stupnjevima) i koliko

dugo (u danima) je vanjska temperatura zraka bila viša od postavljene unutarnje temperature (slika 20). Ipak, specifičnu ili karakterističnu mjesečnu potrošnju za hlađenje nije moguće procijeniti s minimalno prikupljenim ulaznim podacima te kategorizacijska zgrada prema specifičnoj potrebi za hlađenje ne postoji. Korisnici najčešće aktiviraju ili deaktiviraju klima uređaj ovisno o vanjskim vremenskim uvjetima i subjektivnom osjećaju ugone. Iako toplinsko svojstvo zgrade zasigurno utječe na učinak hlađenja, stohastička priroda paljenja i gašenja klima uređaja vrlo lako eliminira tu korelaciju. U poglavlju 5, je prikazan način za kvantifikaciju snage  $P_{el\ kompresor}$  za klima uređaje u okviru modeliranja. Koraci koji su provedeni u ovoj prvoj fazi analize potrošnje „predstavnik“ i izračun specifične potrošnje sažeto su prikazani na slici 21.



Slika 21 Koraci u analizi potrošnje „predstavnik“ i izračunu specifične potrošnje

### 4.5.3. Kategorizacija korisnika i mapiranje specifične potrošnje za grijanje

Nakon izračunavanja specifične mjesečne potrošnje električne energije za grijanje na temelju ulaznih podataka i analize predstavnika, idući korak je kategorizacija i mapiranje izračunate specifične potrošnje na preostale korisnike unutar uzorka.

Na temelju kvalitativne analize prikupljenih podataka iz ankete te uvidom u sustave grijanja i opisnim podacima koji se odnose na energetske svojstvo zgrade (ovojnica, prozori, zasjenjena), svakom je korisniku koji koristi dizalicu topline za grijanje pridijeljena specifična kategorija ovojnice zgrade (tablica 6). Na taj način formirane su tri homogene skupine za koje je potrebno u nastavku kvantificirati fleksibilnost i energetske uštede.

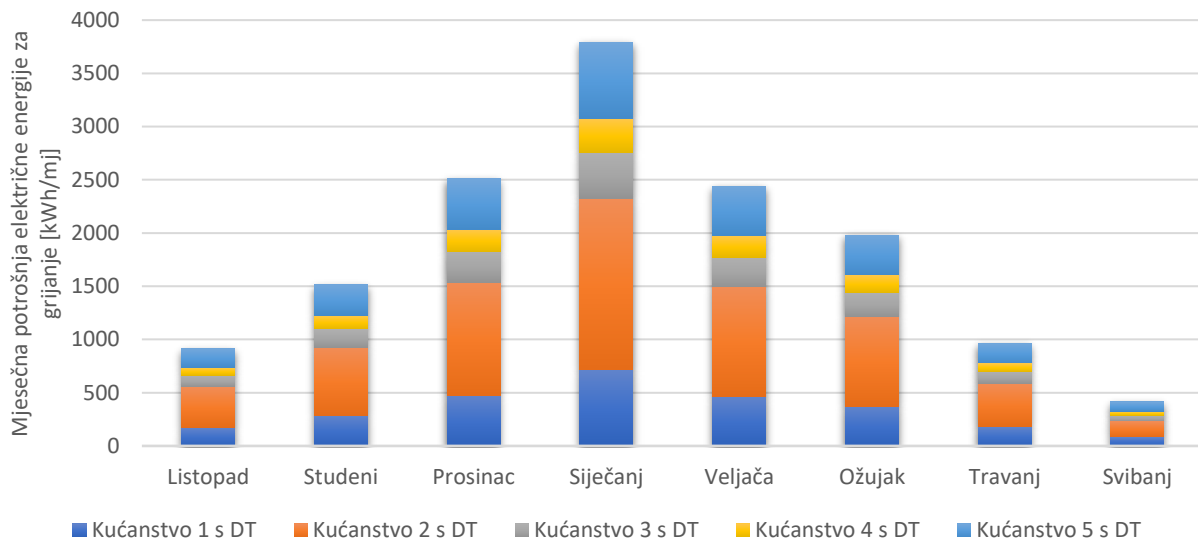
Tablica 6 Kategorizacija korisnika i mapiranje specifične potrošnje

<i>Kategorizacija korisnika – grijanje korištenjem dizalice topline</i>	<i>Procijenjena kategorija ovojnice zgrade</i>
<i>Kućanstvo 1</i>	<b>B</b>
<i>Kućanstvo 2</i>	<b>D</b>
<i>Kućanstvo 3</i>	<b>B</b>
<i>Kućanstvo 4</i>	<b>A</b>
<i>Kućanstvo 5</i>	<b>B</b>

Sumarno, za potrebe daljeg modeliranja mogu se definirati tri kategorije korisnika s obzirom na vanjsku ovojnici zgrade:

- A ili „Dobra izolacija“;
- B ili „Normalna izolacija“;
- D ili „Loša izolacija“.

Na slici 22 prikazana je ukupna potrošnja električne energije za grijanje po pojedinom kućanstvu, na temelju modeliranih podataka. Vidljivo je da najveći udio u ukupnoj potrošnji pripada zgradi, odnosno kućanstvu s lošom toplinskom ovojnici.



Slika 22 Prikaz mjesečne potrošnje električne energije za grijanje

#### 4.6. Određivanje ključnih indikatora za praćenje i verifikaciju energetske ušteda

Za uspostavu uspješnog programa fleksibilnosti potrošnje, koji daje mogućnost ostvarivanja energetske ušteda, potrebno je prepoznati ključne parametre koji utječu na potrošnju električne energije. S obzirom da energetske uštede nije moguće izravno izmjeriti, praćenjem učinka ključnih parametara moguće je kontinuirano evaluirati mogućnost aktivacija temeljem prikupljenih podataka. U okviru izrade ovog modela, prepoznati su indikatori koje je moguće koristiti za praćenje i verifikaciju energetske ušteda.

Ključni uvjeti za uspostavu predloženog programa fleksibilnosti potrošnje su sljedeći:

- izvor toplinske energije u kućanstvu je dizalica topline
  - mogućnost uspostave regresijskog modela između ukupne potrošnje električne energije i stupanj-dana grijanja (HDD) u sezoni grijanja.
- za hlađenje prostora koristi se klima uređaj ili dizalica topline
  - mogućnost uspostave regresijskog modela između ukupne potrošnje električne energije i stupanj-dana hlađenja (CDD) u sezoni hlađenja.

Glavni parametri koji su prepoznati u okviru ovog istraživanja a mogu biti korisni i za *ex-ante* uspostavu programa fleksibilnosti za kućanstva su:

- mjesečna očitavanja o potrošnji električne energije za određena kućanstva;
- polugodišnja ili godišnja očitavanja za potrošnju električne energije za sva kućanstva;
- $Q_{H,nd}$  specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za referentne klimatske podatke;
- površina grijanog prostora;
- površina hlađenog prostora.

Indikatori, koji su prepoznati u okviru ove simulacije, a mogli bi olakšati *ex-post* praćenje i verifikaciju ušteda energije kroz program eksplicitnog upravljanje kućnim trošilima nabrojani su u nastavku:

- $t_a$  - trajanje aktivacije
  - vremenska razlika između trenutka izvršavanja zahtjeva od strane uređaja i trenutka izvršavanja zahtjeva za kraj aktivacije, ako su  $T_z$  trenutak izvršavanja zahtjeva i  $T_x$  trenutak zahtjeva za kraj aktivacije

$$t_a = T_z - T_x \quad (3)$$

- $t_z$  – trajanje zahtjeva aktivacije
  - vremenska razlika između trenutka odaslanog zahtjeva za aktivaciju od strane agregatora i trenutka izvršavanja zahtjeva od strane uređaja, ako su  $T_s$  trenutak slanja zahtjeva i  $T_z$  trenutak izvršavanja zahtjeva

$$t_z = T_s - T_z \quad (4)$$

- $T_u$  – unutrašnja temperatura
  - Očitana unutrašnja temperatura unutar prostorije
- $T_v$  – vanjska temperatura
  - Očitana vanjska temperatura
- $t_{rad\ sustava}$  – vrijeme rada sustava, kompresora

- ako nije moguće izravno mjeriti, potrebno je koristiti referentne vrijednosti koje su dobivene regresijskim modelom gdje je  $trad\ sustava$  funkcija jedne ili više nezavisnih varijabli
- $n_{fleksibilnosti(T)}$  – broj aktivacija fleksibilnosti
  - broj aktivacija unutar dana, mjeseca i godine, gdje je  $n_i$  registrirana aktivacija (1 ako je aktivacija izvršena ili 0 ako nije)

$$n_{fleksibilnosti(T)} = \sum_{T=1}^i n_i \quad (5)$$

- $\eta_a$  – učinak aktivacija
  - omjer broja odaslanih i izvršenih zahtjeva, gdje je  $n_{fleksibilnosti}$  broj aktivacija fleksibilnosti a  $n_{zahtjeva}$  broj ukupnih zahtjeva koji je agregator poslao prema korisniku

$$\eta_{a(T)} = \sum_{T=1}^i \frac{n_i}{n_{zahtjeva(i)}} \quad (6)$$

- $\eta_{EE}$  - omjer samodostatnosti
  - omjer između proizvedene električne energije  $E_{proizvedena}$  i potrošene energije  $E_{potrošena}$

$$\eta_{EE(T)} = \sum_{T=1}^i \frac{E_{proizvedena(i)}}{E_{potrošena(i)}} \quad (7)$$

Da bi se ti podaci mogli prikupiti i ispravno interpretirati ključna je uspostava funkcionalne standardizirane arhitekture za prikupljanje podataka i upravljanje potrošnjom. Glavni problem interoperabilnosti je na razini interpretacije tereta poruke, a ne na razini komunikacijskog protokola.

OpenADR je jednostavan i razmjerno lako provediv protokol za razmjenu podataka, no semantika nije jednoznačno postavljena i time nastaje problem interpretacije prenesenog podatka s dvije strane koje komuniciraju putem protokola OpenADR, a izgradnja semantičkih ekstenzija za OpenADR je zahtjevan zadatak.

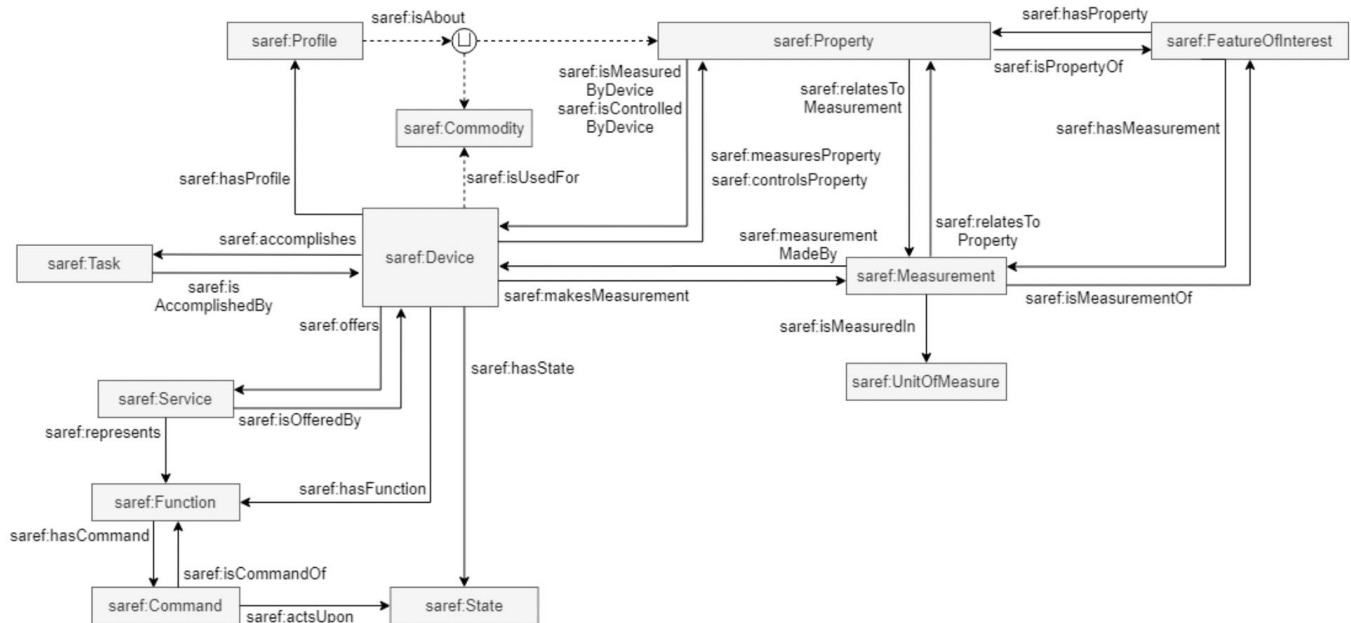


U praksi, to zahtijeva izradu zajedničkog informacijskog modela koji jasno i striktno definira semantiku prenesenih podataka. Informacijski model mora zadovoljiti nekoliko suprotstavljenih zahtjeva: mora biti razmjerno jednostavan za implementaciju, dovoljno striktan da odbacuje poruke koje nisu sukladne s modelom, ali i dovoljno fleksibilan kako bi mogao biti proširiv i podržavati različite tržišne strukture. Zahtjev za jednostavnost i zahtjev za fleksibilnost i proširivost izravno su suprotstavljeni. Postoji cijeli niz inicijativa i ontologija s različitim razinama uspješnosti. Pretjerano kompleksne ontologije u praksi nisu upotrebljive, dok one pretjerano jednostavne nisu dovoljno striktno za osiguravanje zajedničkog informacijskog modela između komponenata sustava za upravljanje potrošnjom.

Na nižim razinama, odnosno „unutar kuće“, postoji cijeli niz ontologija, poput ThinkHome [138], OntoENERGY [139], BOnSAI [140], Energy@Home [141], SEMANCO [142], EEBUS [143], ali kao najnaprednije rješenje nameće se SAREF [144].

SAREF (Smart Appliances REference ontology) je ontologija koja olakšava podudaranje postojećih semantičkih imovina (eng. *assets*) u domeni pametnih trošila i omogućava komunikacijsku interoperabilnost između pametnih trošila. U okviru SAREF-a je pojednostavljeno prevođenje iz jedne semantičke imovine u drugu, tj. potreban je jedan set mapiranja za svaki uređaj (semantička imovina) umjesto posvećenog mapiranja za svaki par semantičke imovine (dva uređaja koji međusobno komuniciraju) [144].

Korištenjem SAREF-a, semantičke imovine (uređaji) mogu nastaviti koristiti izvornu terminologiju i podatkovne modele, a da pritom budu u interakciji putem zajedničke semantike (slika 23). Putem SAREF ontologije mogu se definirati: vrsta objekta (npr. vrata, prozor), prostorija unutar koje se objekt nalazi, vrsta energenta, uređaj (npr. perilica, senzor, mjerni uređaj itd.), kategorija uređaja, trajanje odziva, funkcija (npr. mjerenje), kategorija funkcije, profil potrošnje, svojstvo (npr. energija, vlaga, vrijeme, snaga itd.), usluga, status, zadatak (npr. čišćenje, sigurnost itd.), vremenski entitet i mjerna jedinica. SAREF omogućava klasifikaciju uređaja kroz tri glavne kategorije: funkcijske, energetske i uređajne. Profil koji se definira za svaki uređaj unutar SAREF-a može biti koristan i u kontekstu prikazivanja energetske uštede unutar zgrade ili prostorije [33].



Slika 23 Primjer klasa i hijerarhije unutar SAREF ontologije [144]

Informacije dobivene kroz OpenADR mogu se koristiti za neposrednu registraciju smanjenja opterećenja, a SAREF ontologija bi mogla pružiti koristan uvid u odnose između uređaja uključenih u program fleksibilnosti potrošnje kako bi se olakšala procjena energetske uštede.

Ne postoji zajednički informacijski model koji pokriva cijeli semantički opseg i hijerarhiju entiteta koja je potrebna za aktivaciju fleksibilnosti. Ne postoji semantički model koji je ekvivalentan IEC CIM-u [145] u elektroenergetskim mrežama.

Posljednjih godina bilo je nekoliko pokušaja da se razviju ontologije koje su izgrađene da pokriju tu svrhu. Primjer je Brick Ontology [146], koji se sastoji od proširivog rječnika pojmova i koncepata u kontekstu zgrada, mogućnosti povezivanja i sastavljanja koncepata te fleksibilnog podatkovnog modela koji dopušta integraciju Bricka s postojećim alatima i bazama podataka. Ontologija Brick je hijerarhijski model klasa. Postulat je da u procesu identificiranja odgovarajuće klase za entitet, korisnik može pregledavati hijerarhiju od najopćenitijih klasa (oprema, lokacija, senzor, zadana vrijednost, tvar) do specifične klase čija definicija najbolje opisuje entitet.

Sličan pristup provodi projekt Haystack, gdje se za opis podataka koristi pristup označavanja podataka (eng. *tagging*). Oznake su dizajnirane kao semantički nositelji, a podaci su samoopisni. To je posebno važno za proširivost podatkovnog modela, budući da tipične ontologije koriste stroge ontološke odnose, a korisnik se mora pridržavati odabira apstrakcija unutar standarda. U takvom modelu koji se temelji na označavanju, definiran je standardizirani deskriptivni vokabular i prijenosni mehanizam bez nametanja striktnog ontološkog hijerarhijskog modela. Semantičke informacije su kodirane u obliku svojstava ili oznaka. Ipak, korištenje ovog modela bez hijerarhijskih klasa za potrebe dokazivanja ušteda kroz aktivaciju fleksibilnosti potrošnje može biti rizično zbog mogućnosti pogrešnog označavanja. Međuodnos između imovine i koncepata na razini zgrade je od značajne važnosti za određivanje ušteda.

Za potrebe postavljanja programa fleksibilnosti potrošnje, postojeći standardi kao što su OpenADR i IEC 61850 primjenjivi su kao dio funkcionalne arhitekture za aktivaciju fleksibilnosti i komunikaciju agregatora i pružatelja fleksibilnosti (kućanstva).

Kada se razmatra mogućnost praćenja i verifikacije učinka programa fleksibilnosti koji zahtijeva uštede energije, potrebne su dodatne semantičke informacije prikupljene iz uređaja, senzora i slično. Taj korak je ključan za dobivanje relevantne *ex-post* analize učinka programa. Postojeći podatkovni modeli (tj. SAREF) nude takva rješenja, ali treba razviti određenu semantičku interoperabilnost između komunikacijskih standarda i ontoloških podatkovnih modela.

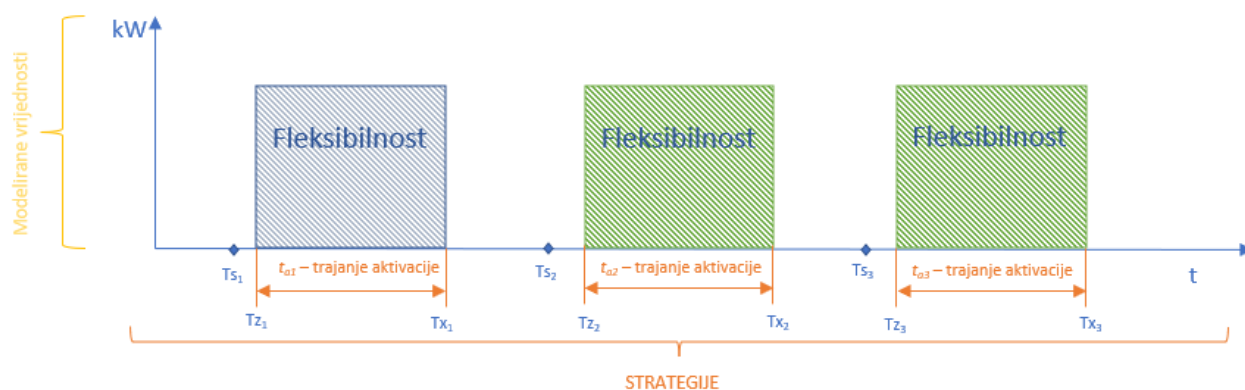
Interoperabilnost mora funkcionirati i na tehničkoj i na semantičkoj razini. Za *ex-post* analizu i procjene učinka programa korištenjem procedura praćenja i verifikacije, dosljedna i nedvosmislena interpretacija podataka je apsolutno neophodna.

## 5. KVANTIFIKACIJA FLEKSIBILNOSTI KUĆANSTAVA

U prethodnom koraku analizirana je potrošnja tzv. predstavnika potrošnje, identificirani su ključni parametri koji utječu na potrošnju električne energije izvora fleksibilnosti, te je napravljena kategorizacija i mapiranje korisnika prema tipičnim obrascima potrošnje za grijanje. Cilj je uspostava metode koja omogućavanje kvantifikaciju fleksibilnosti kućanstava uz minimalno dostupan skup ulaznih podataka. Da bi se fleksibilnost mogla kvantificirati, prvi korak je provjera mogućnosti uspostave regresijskih modela analizom ključnih parametara koji utječu na potrošnju električne energije. Nakon postavljene korelacije, idući korak je simulacija programa aktivacija te uspostava metode koja omogućava kvantifikaciju fleksibilnosti kućanstava.

Za simulaciju programa aktivacija, potrebno je primijeniti određene strategije aktivacije koje ovise o dostupnosti izvora fleksibilnosti, karakteristikama ovojnice zgrade, zauzeću kućanstva u određenom trenutku, željom za prioritizacijom samodostatnosti (ako korisnici raspolažu s vlastitom FN elektranom) itd.

Na slici 24 je jednostavnim grafom prikazano što podrazumijevaju strategije aktivacije u okviru ovog modela. Dostupna snaga s kojom se raspolaže u okviru ovog programa je snaga kompresora  $P_{el\ kompresor}$  koja je dobivena modeliranjem (pristup prikazan u nastavku), i predstavlja vrijednost na Y-osi. Strategije aktivacije (X-os) odnose se na to u kojem trenutku i koliko dugo će određena aktivacija trajati ( $t_a$  – trajanje aktivacije), i koliko puta je aktivacija primjenjiva tijekom dana s obzirom na prethodno nabrojane limitirajuće parametre. Optimizacijski cilj je naravno maksimizacija ušteda (fleksibilnosti) bez utjecaja na komfor korisnika.



Slika 24 Slikoviti prikaz strategija za aktivaciju

## 5.1. Modelirane vrijednosti

### 5.1.1. Modeliranje angažirane snage

Jedan od ključnih parametara za izračun ušteda energije koje su dobivene kratkotrajnim aktivacijama fleksibilnosti potrošnje je angažirana radna snaga u programu fleksibilnosti (kW). U okviru ovog modela koji simulira okruženje, gdje su glavni izvori fleksibilnosti tj. kandidati za postizanje ušteda energije dizalice topline i klima uređaji, a njihova snaga električne energije je  $P_{el\ kompresor}$ , pa je tu vrijednost potrebno procijeniti.

Za potrebe modeliranja  $P_{el\ kompresor}$ , u prvom koraku korištene su procijenjene vrijednosti za potrošnju električne energije za grijanje (poglavlje 4.5.3). Za analiziranu godinu i sezonu grijanja (od listopada 2020. do svibnja 2021.) preuzete su vrijednosti HDD za prosječnu željenu unutrašnju temperaturu od 22,5 °C iz javno dostupnog izvora [131] za meteorološku stanicu Omišalj, Krk. Prema prikupljenim podacima, taj period je ukupno imao 238 aktivnih dana grijanja. Mjesec siječanj je imao ukupno 31 dan grijanja i korisnici su tada imali najveću potrošnju električne energije. S obzirom na konzistentnost grijanja u siječnju i značajnu ovisnost potrošnje o vanjskoj temperaturi, koja je registrirana kod predstavnika potrošnje (kućanstvo 2), ocijenjeno je da je taj mjesec relevantan za modeliranje angažirane snage. Prema HRN EN ISO 13790 [134], vrijeme rada sustava grijanja za stambene zgrade i sustave s nekontinuiranim radom je 17 sati dnevno (s/d), i to od 06:00 to 23:00 h. Kao što je i predloženo u smjernicama [32], za inicijalnu procjenu potrošnje u kućanstvima nisu eliminirani vikendi te je svih 31 dana uzeto u obzir za ovaj izračun.

Imajući u vidu da je 17 sati rada sustava ( $t_{rad\ sustava}$ ) relativno puno, ta vrijednost je primijenjena u izračunu za snagu kompresora predstavnika 1 s relativno lošim toplinskim karakteristikama zgrade i proveden je sljedeći izračun  $P_{el\ kompresor} = E_{grijanja(siječanj)}/31(d)/17(h)$ .

Kompresor kada je aktivan radi na gotovo punoj snazi što dovodi do zaključka da je izračunata snaga (u ovom slučaju 3 kW) relevantna za sve mjesece u godini za istog korisnika.

Preostale zgrade unutar uzorka prikazale su drugačije karakteristike toplinske inercije pa je ocijenjeno da je  $t_{rad\ sustava}$  od 17 h za njih neprimjenjivo te su napravljeni sljedeći korektivni faktori:

- $t_{rad\ sustava\ (normalna\ izolacija)} = 0,65 \times t_{rad\ sustava}$  i
- $t_{rad\ sustava\ (dobra\ izolacija)} = 0,41 \times t_{rad\ sustava}$ .

Izračunate snage  $P_{el\ kompresor}$  kreću se između 1,24 kW i 3 kW, što predstavlja dobru sliku stvarnog stanja s obzirom na vrlo malo prikupljenih podataka. Veće snage dobivene su za korisnike s lošim toplinskim izolacijama i/ili većom kvadraturom, a to su parametri koji se uzimaju u obzir prilikom dimenzioniranja dizalice topline i pripadajuće snage kompresora. Važno je naglasiti da su svi korisnici unutar uzorka za grijanje stalno nastanjeni korisnici pa je i njihova potrošnja konzistentnija tijekom cijele godine.

Angažirane snage  $P_{el\ kompresor}$  je ipak puno teže procijeniti. Parametri koji se uzimaju u obzir kod instalacije klima uređaja su uglavnom kvadratura prostora koji se hladi i toplinska izolacija zgrade. Ipak, prilikom instalacije dizalice topline očekivano je da će se provesti puno detaljnija analiza postojećeg stanja zgrade nego li je to slučaj s instalacijom klima uređaja. Energetska učinkovitost i godina ugradnje klima uređaja unutar nekog uzorka može biti raznolika, budući da novi i učinkoviti klima uređaji troše puno manje energije nego stari i neučinkoviti. S obzirom da bi analiza stanja klima uređaja zahtijevala detaljniji pregled, u okviru ovog istraživanja napravljena je sljedeća procjena koja je napisana u nastavku. Opis korisnika za modalitet hlađenja prikazan je u tablici 7.

Tablica 7 Opis korisnika za modalitet hlađenja

	<i>Sustav hlađenja</i>	<i>Ukupna površina hlađenog prostora [m<sup>2</sup>]</i>	<i>Broj klima uređaja u kućanstvu</i>	<i>Tip zauzeća</i>
<i>Kućanstvo 1</i>	Dizalica topline (DT) za hlađenje	200	1	Stalno
<i>Kućanstvo 2</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	60	2	Stalno
<i>Kućanstvo 3</i>	Dizalica topline (DT)) za hlađenje	120	1	Stalno
<i>Kućanstvo 4</i>	Dizalica topline (DT) za hlađenje	180	1	Stalno
<i>Kućanstvo 5</i>	Dizalica topline (DT) za hlađenje	190	1	Stalno
<i>Kućanstvo 6</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	44	1	Stalno
<i>Kućanstvo 7</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	24	1	Stalno
<i>Kućanstvo 8</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	40	1	Stalno
<i>Kućanstvo 9</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	52	2	Stalno
<i>Kućanstvo 10</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	24	1	Stalno
<i>Kućanstvo 11</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	96	2	Stalno
<i>Kućanstvo 12</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	54	2	Stalno
<i>Kućanstvo 13</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	40	1	Stalno
<i>Kućanstvo 14</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	30	1	Povremeno
<i>Kućanstvo 15</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	44	1	Povremeno
<i>Kućanstvo 16</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	24	1	Povremeno
<i>Kućanstvo 17</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	120	3	Povremeno
<i>Kućanstvo 18</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	41	1	Povremeno
<i>Kućanstvo 19</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	28	1	Povremeno
<i>Kućanstvo 20</i>	Klima uređaj (KU) za hlađenje	13	1	Povremeno

Tablica 7 prikazuje kućanstva koja imaju ugrađenu dizalicu topline ili standardne zidne klima uređaje. Dizalica topline može se koristiti i u režimu hlađenja, pa onda radi na isti način kao i klima uređaj. Za potrebe ove simulacije, snaga kompresora ( $P_{el\ kompresor}$ ) koja je izračunata za grijanje kod korisnika 1, 3, 4 i 5 koriste se i za potrebe hlađenja dok je za preostale korisnike snaga  $P_{el\ kompresor}$  izračunata kao funkcija ukupne kvadrature koja se hladi. Pretpostavljeno je da se  $P_{el\ kompresor}$  kreće između 1 i 2 kW po uređaju, što bi značilo da se za  $\geq 50\text{ m}^2$  koriste dvije odvojene jedinice klima uređaja, a za  $\geq 100\text{ m}^2$  tri ili više jedinica

### 5.1.2. Simulacija rada sustava

Nakon određivanje snage, idući korak je izračun ukupnog vremena rada kompresora tijekom dana  $t_{rad\ sustava}$ . Kako je snaga relativno konstantna, proveden je sljedeći izračun.

Za sezonu grijanja, tj. mjesec siječanj u sezoni intenzivnog grijanja, dobivene su izračunate vrijednosti za  $t_{rad\ sustava}$  kako slijedi:

- $t_{rad\ sustava}\ (loša\ izolacija) = 17\text{ h/d}$ ;
- $t_{rad\ sustava}\ (prosječna\ izolacija) = 11\text{ h/d}$  i
- $t_{rad\ sustava}\ (dobra\ izolacija) = 7\text{ h/d}$ .

To znači da je s konstantom snagom  $P_{el\ kompresor}$  moguće odrediti i  $t_{rad\ sustava}$  i za prestale mjesece u godini, prema izrazu:

$$t_{rad\ sustava} = \frac{E_{grijanje, dnevno(mjesec\ i)}}{P_{el\ kompresor}} \quad (8)$$

gdje je

$$E_{grijanje, dnevno(mjesec\ i)} = \frac{E_{(mjesec\ i)}}{\text{broj\ dana\ grijanja\ } mjesec\ i} \quad (9)$$

a broj dana grijanja označava pozitivnu vrijednost HDD u svakom danu u mjesecu (za ovaj slučaj ako je  $HDD > 2$ ). Jednom kada su  $t_{rad\ sustava}$  izračunati za karakterističan dan u mjesecu i s obzirom da sustav kompresor ne radi kontinuirano unutar jednog dana, potrebno je napraviti simulaciju razdiobe aktivacija za svaki izračunati  $t_{rad\ sustava}$  u sezoni grijanja. Simulirano je ukupno 24 različitih razdiobi, a za svaki simulirani dan napravljeno je 3 različitih razdiobi ovisno o



energetskom svojstvu zgrade. Prosječno aktivno vrijeme rada sustava unutar jednog perioda je 15-25 min, a razmak između paljenja i gašenja je otprilike 30-45 min, ovisno o promatranom danu. Ako je  $t_{rad\ sustava}$  veći, gušća je i razdioba aktivacija (razmaci između aktivacija su manji), a ako je  $t_{rad\ sustava}$  manji, razdioba između aktivacija je rjeđa. Simulacija je napravljena na način da razdioba aktivacija nije u potpunosti uniformna tijekom 24 sata, jer se pretpostavlja da korisnici postavljaju nižu temperaturu tijekom noći, pa su onda i aktivacije rjeđe. Također, pretpostavljeno je da su s padom vanjske temperature zimi i aktivacije učestalije. Svakoj simuliranoj razdiobi aktivacija pridijeljen je i odgovarajući HDD, a izabran je na način da je izračunati  $t_{rad\ sustava}$  dodijeljen danu koji odgovara medijanu HDD-a u promatranom mjesecu.

Za sezonu hlađenja  $t_{rad\ sustava}$  je puno teže procijeniti. Klima uređaj pali po istom principu kao i dizalica topline te temeljem dobivenih razdiobi za grijanje može se zaključiti da  $t_{rad\ sustava}$  u sezoni hlađenja uobičajeno ne iznosi više od 8 sati. Za potrebe hlađenja simulirano je 5 različitih razdiobi koji uzimaju u obzir dnevni porast i pad temperatura tijekom ljetnih sati. Također, s obzirom da riječ o mediteranskoj klimi, očekuje se da će gušća razdioba aktivacija biti tijekom dana između 12:00 i 16:00 h. Svaka razdioba pridijeljena je referentnom danu s odgovarajućim CDD.

U okviru ovog modela pretpostavljene su sljedeće korelacije:

- $t_{rad\ sustava}$  (grijanje) ukupno vrijeme rada sustava u jednom danu je funkcija stupnja dana grijanja (HDD), odnosno varijacije vanjske temperature u odnosu na postavljenu unutarnju temperaturu;
- $t_{rad\ sustava}$  (hlađenje) ukupno vrijeme rada sustava u jednom danu je funkcija stupnja dana hlađenja (CDD), odnosno varijacije vanjske temperature u odnosu na postavljenu unutarnju temperaturu uz pretpostavku da je za:
  - $t_{rad\ sustava}$  (hlađenje) klima uređaj Za stalne korisnike s decentraliziranim sustavom (običan klima uređaj)  $0,9 \times t_{rad\ sustava(centraliziran)}$
  - $t_{rad\ sustava}$  (hlađenje) klima uređaj Za povremene korisnike s decentraliziranim sustavom (običan klima uređaj)  $0,3 \times t_{rad\ sustava(centraliziran)}$ .

## 5.2. Algoritam za optimiziranje ušteda energije bez utjecaja na ugodu korisnika

Idući korak je simulacija programa aktivacija fleksibilnosti temeljem definiranih ograničenja i ciljeva. Za potrebe simuliranja mogućih aktivacija nad ulaznim parametrima koji su dobiveni prethodnim korakom, definiran je algoritam.

### Početni uvjeti

- *Smanjivanje efekta bumeranga*“: kada bi smanjivanje  $t_{rad\ sustava}$  u intervalu  $T_1$  trajalo 10 min, zbog zadržavanja unutrašnje temperature iduća aktivacija u intervalu  $T_2$  trebala bi se produžiti za 5 min. Takav scenarij ne bi pridonio ukupnom  $t_{rad\ sustava}$  unutar dana pa se neće razmatrati. Na ovakav način je spriječena situacija da u idućem intervalu novo sljedeće trajanje aktivacije  $t_{rad\ sustava}(T_2)$  bude dulje od maksimalnog „starog trajanja aktivacija“
- Nakon primjenjivanja aktivacije fleksibilnosti potrošnje unutar dana  $n_{fleksibilnosti(T)}$ ,  $t_{rad\ sustava}$  unutar jednog dana treba biti manji.

### Minimalni period rada sustava

- Minimalni period označava  $t_{rad\ sustava}$  u nekom intervalu  $T$  bez primjene fleksibilnosti, a postavljen je na 10 minuta.

### Idealan slučaj

- Idealan slučaj se odvija kada je fleksibilnost primjenjiva na svaki drugi interval  $t_{rad\ sustava}$

### Dogrijavanje

- Dogrijavanje je slučaj kada je razlika stvarnog  $t_{rad\ sustava, stvarno}$  i minimalnog  $t_{rad\ sustava, min}$  trajanja aktivacije veće ili trajanje neaktivnog intervala između dvije aktivacije rada kompresora u promatranom periodu  $T$ . Minimalni interval  $T$  koji se promatra uključuje trenutnu aktivaciju sustava i sljedeće dvije aktivacije, kako bi se mogao provjeriti „idealni slučaj“. Ako taj uvjet nije zadovoljen, u pitanju je dogrijavanje.

### Postavljeni uvjeti za aktivaciju fleksibilnosti

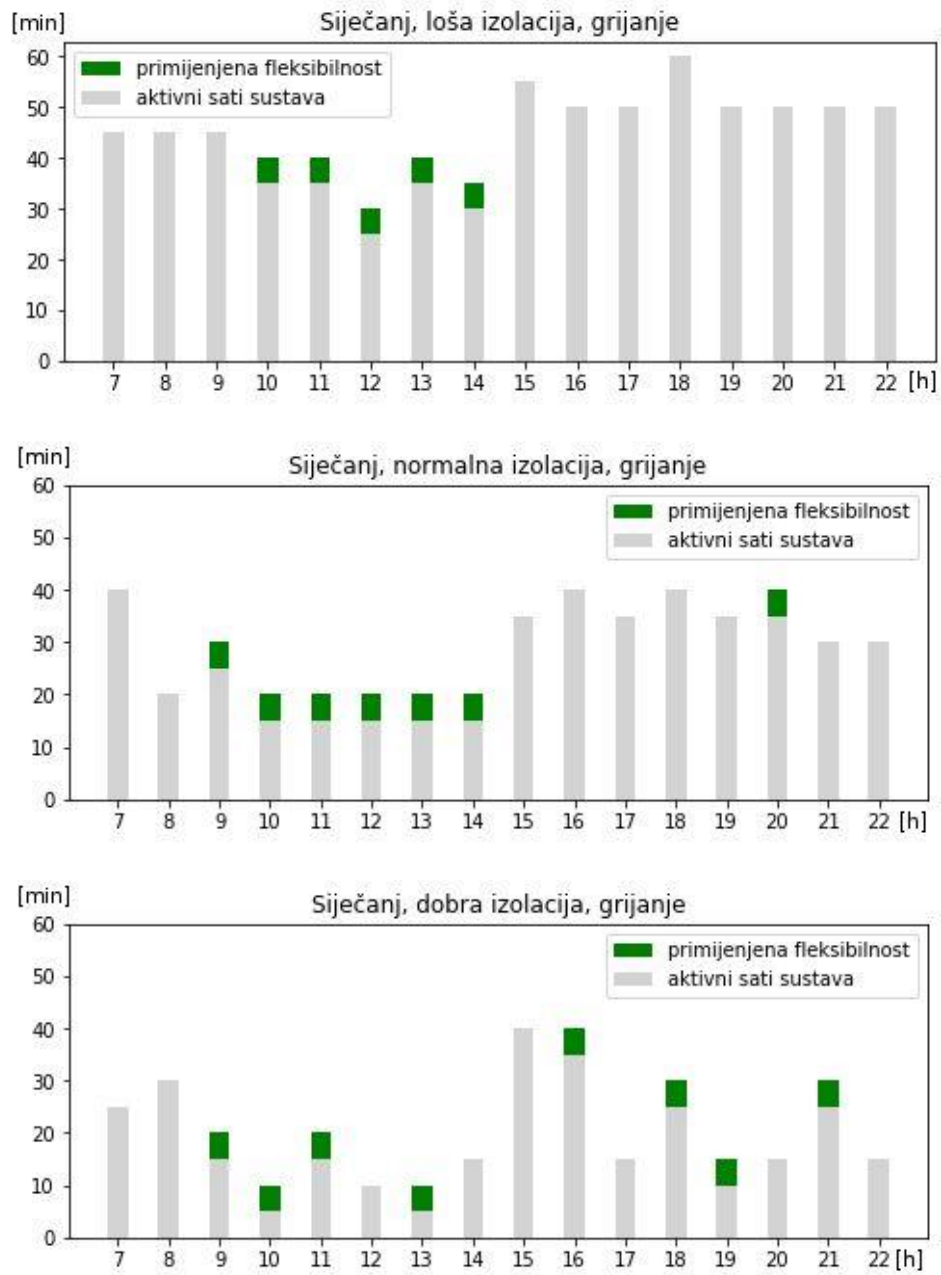
- primjenjiva u periodu 9:00-22:00 sati
- ne može se primijeniti na dvije uzastopne aktivacije
- ne može se primjenjivati na periode kada traju dogrijavanja.

Isti algoritam primijenjen je i za slučaj hlađenja, gdje hlađenje jednostavno zamjenjuje grijanje.

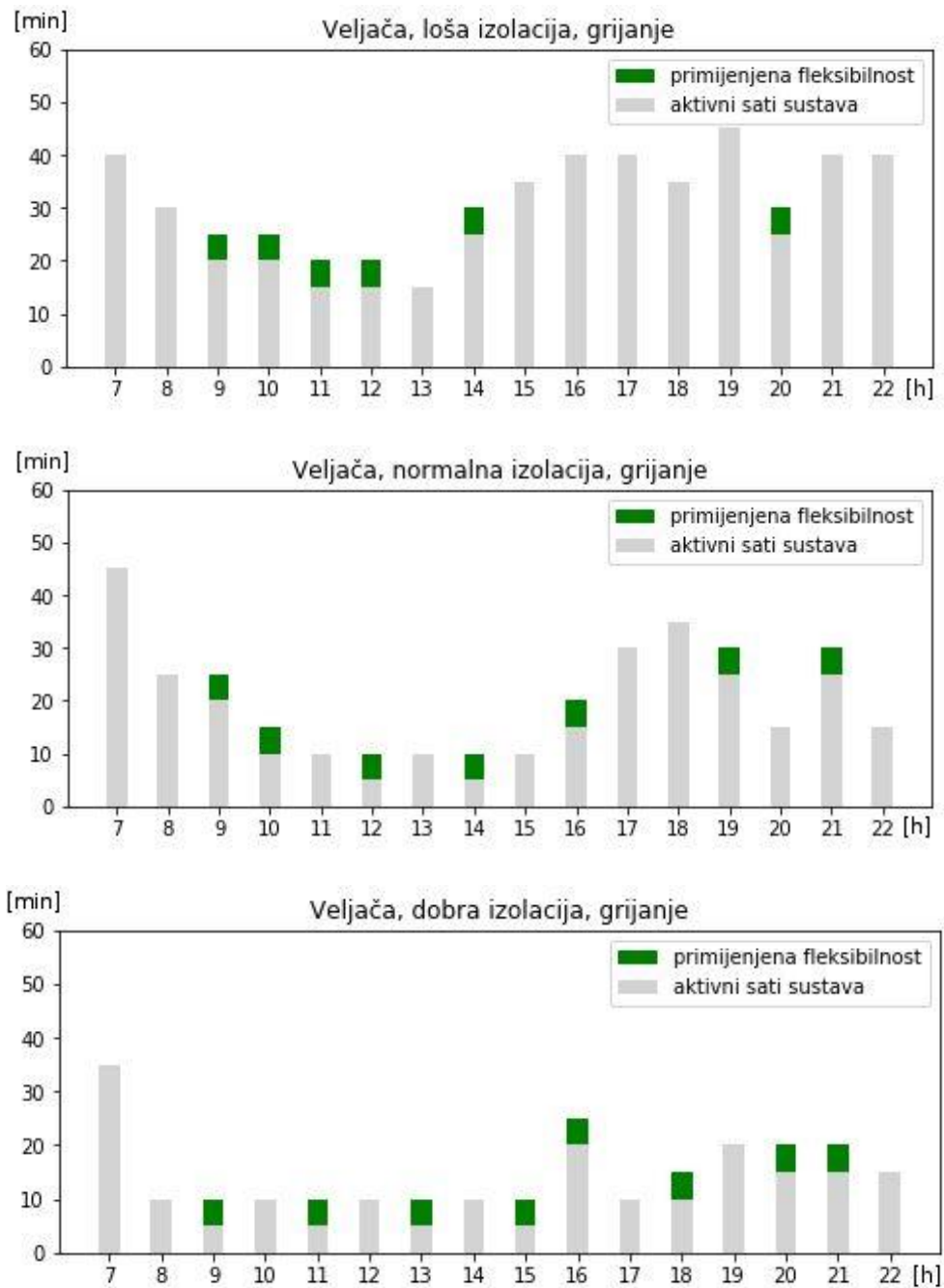
### **5.2.1. Rezultati**

Nakon primjene algoritma za optimiranje ušteda energije i temeljem simulacija razdiobe  $t_{rad\ sustava}$  tijekom dana (opisane u 5.1.2), neki od dobivenih rezultata prikazani su u nastavku.

Rezultati sa slike 25 prikazuju raspodjelu  $t_{rad\ sustava}$  unutar istog dana u godini za kućanstva s različitim izolacijama. Na X-osi prikazani su sati unutar dana, dok je na Y-osi kumulativno prikazano  $t_{rad\ sustava}$  vrijeme rada sustava unutar istog sata. Iz prikaza je vidljivo da je broj aktivacija fleksibilnosti ili odziva potrošnje ( $n_{fleksibilnosti(T)}$ ) unutar istog dana veći za kućanstva ili korisnike s boljom toplinskom izolacijom, a manji za kućanstva s lošijom ovojnicom zgrade. Ta pojava se događa u najvećoj mjeri zbog dogrijavanja prostora, tj. veće učestalosti rada kompresora dizalice topline u hladnijim danima da bi se ostvarila željena unutrašnja temperatura. U slučaju ovog prikaza, podrazumijeva se da se radi o stalnim korisnicima s postavljenom fiksnom unutrašnjom temperaturom tijekom dana.



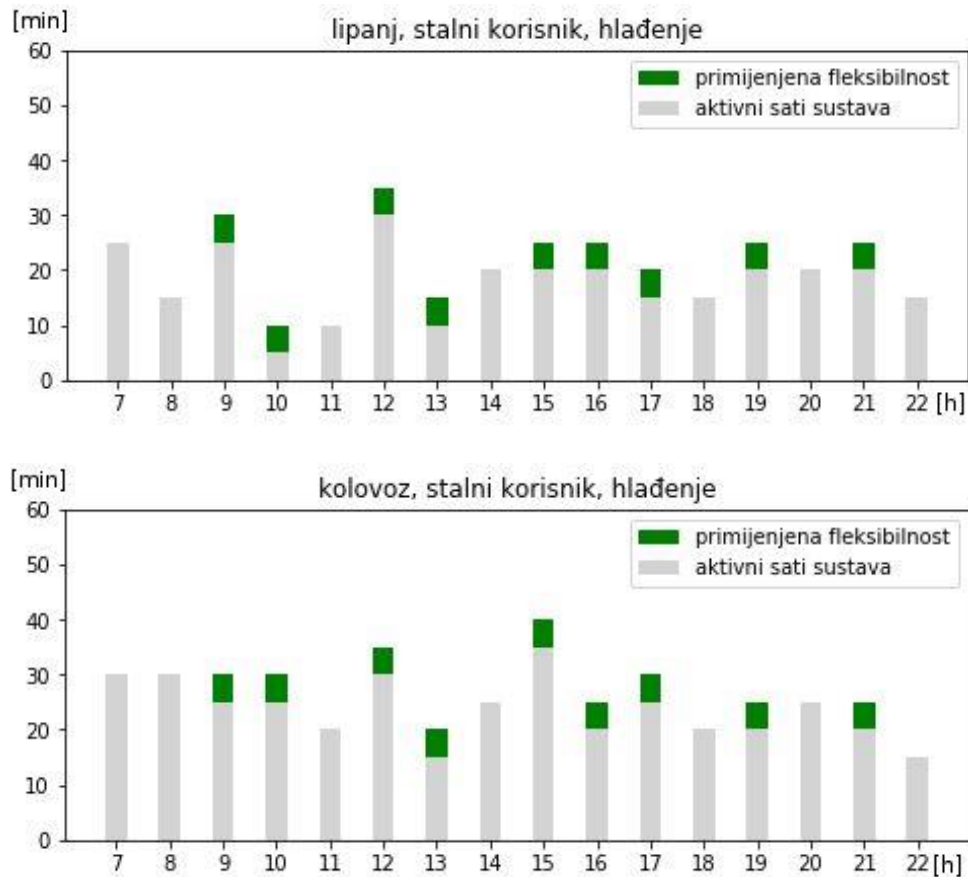
Slika 25 Primjer aktivacija fleksibilnosti unutar istog dana u siječnju



Slika 26 Primjer aktivacija fleksibilnosti unutar istog dana u veljači

Isti slučaj je vidljiv i na slici 26, gdje kućanstva s boljom izolacijom pokazuju bolje performanse po kriteriju broja aktivacija fleksibilnosti  $n_{fleksibilnosti(T)}$  od kućanstva s lošijom vanjskom izolacijom.

Za slučaj hlađenja dobiveni su rezultati sa slike 27. Rezultati pokazuju konzistentnost u aktivacijama tijekom karakterističnog (toplog) dana u lipnju i kolovozu. Rezultat prikazuje rad sustava hlađenja u kontinuiranom režimu tijekom cijelog dana, što je uobičajeni slučaj za stalne korisnike kućanstva s ugrađenom dizalicom topline iliti centraliziranim sustavom hlađenja.

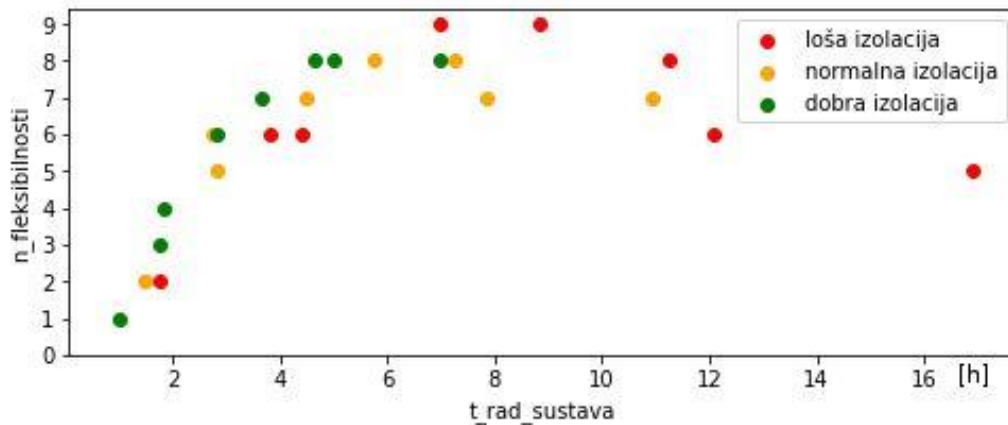


Slika 27 Primjer aktivacija fleksibilnosti za dva karakteristična dana u lipnju i kolovozu

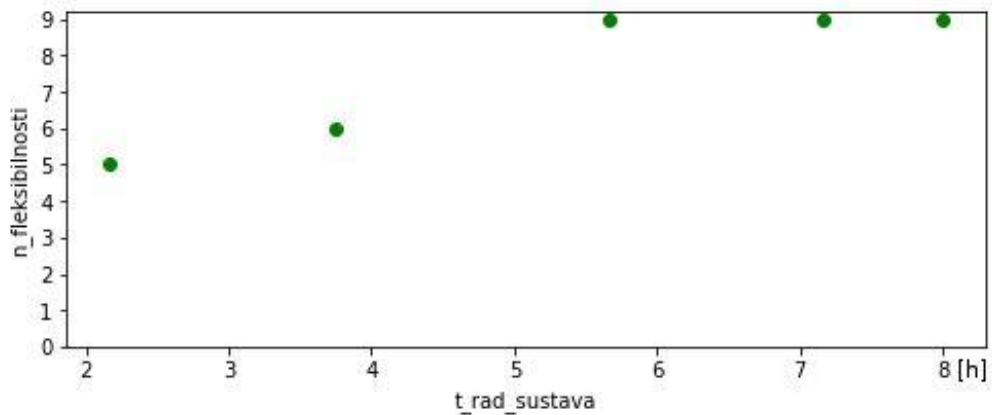
Iako su aktivacije fleksibilnosti  $t_a$  relativno kratke (po 10 min svaka), daju dodatnu prednost u smislu održavanja komfora korisnika, jer kako je utvrđeno i u [147], kratkotrajne aktivacije fleksibilnosti imaju minimalan utjecaj na udobnost korisnika.

### 5.3. Korelacijske analize

Sumarni rezultati simulacija aktivacija fleksibilnost prikazani su na slikama 28 i 29. Veći broj rezultata dobiven je za sezonu grijanja nego li je to slučaj za sezonu hlađenja, što je bilo očekivano s obzirom na veći broj prikupljenih podataka u sezoni grijanja. Korelacije između  $t_{rad\ sustava}$  (vrijeme rada sustava) i  $n_{fleksibilnosti(T)}$  (broj aktivizacija fleksibilnosti ili odziva potrošnje) za sezonu grijanja stabilnije su nego li je to slučaj za sezonu hlađenja.



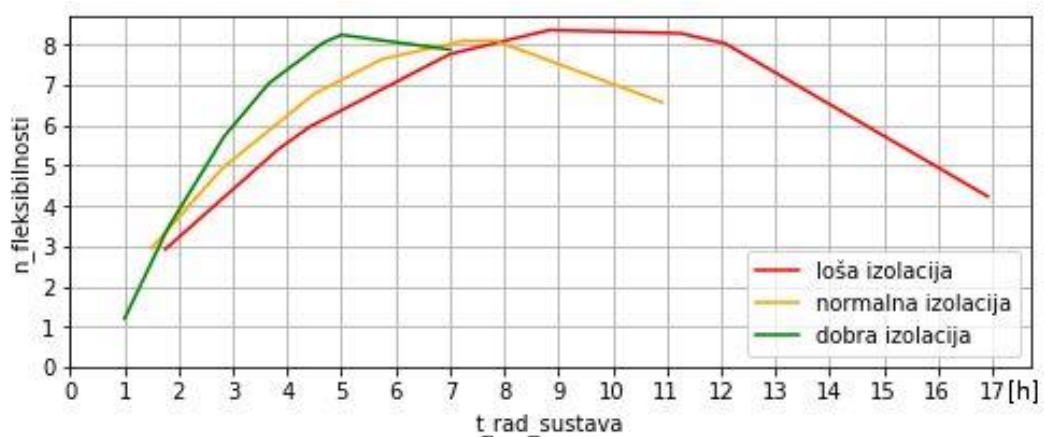
Slika 28 Rezultati simulacije - aktivacija fleksibilnosti u režimu grijanja



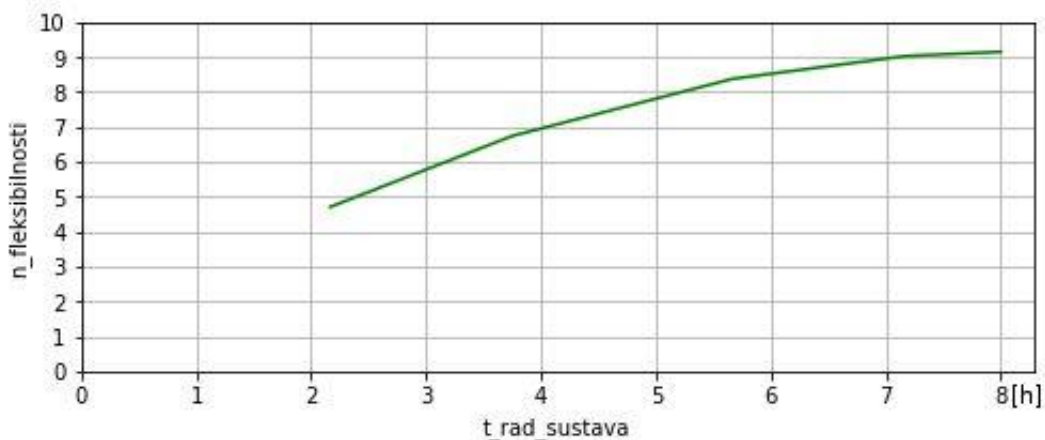
Slika 29 Rezultati simulacije - aktivacija fleksibilnosti u režimu hlađenja

Regresijskom analizom dobivene su funkcije koje su prikazane na slikama 30 i 31. Kao što je vidljivo sa slike 30, maksimalan broj aktivacija  $n_{fleksibilnosti(T)}$  fleksibilnosti potrošnje unutar jednog dana je isti za sve kategorije kućanstva koji se griju, neovisno o učinkovitosti toplinske izolacije.

Međutim, maksimalan broj aktivacija (u ovom slučaju 8) se postiže prije, odnosno s manjim  $t_{rad\ sustava}$ . U okviru principa „energetska učinkovitost prvo“ (eng. *Energy efficiency first principle*) [5], ovaj rezultat je povoljan jer ukazuje da su energetske učinkovitije zgrade „bolji“ kandidati za aktivaciju fleksibilnosti potrošnje, budući da ravnomjernije troše energiju, dobra toplinska izolacija sporije otpušta toplinsku energiju u okoliš. Također, s većim  $t_{rad\ sustava}$  opada i broj aktivacija  $n_{fleksibilnosti(T)}$ , što znači da u periodu intenzivnijeg grijanja ima više dogrijavanja prostora, pa nije povoljno aktivirati fleksibilnost jer bi to moglo izravno utjecati na komfor korisnika u kućanstvima.



Slika 30 Regresijski model za broj aktivacija i aktivnog rada sustava - grijanje



Slika 31 Regresijski model za broj aktivacija i aktivnog rada sustava – hlađenje

Za slučaj hlađenja, pad funkcije nije zabilježen s povećanjem  $n_{fleksibilnosti(T)}$  što ukazuje na to da je intenzivnije hlađenje (suprotno od tzv. dogrijavanja) prostora teže zabilježiti jednostavnom



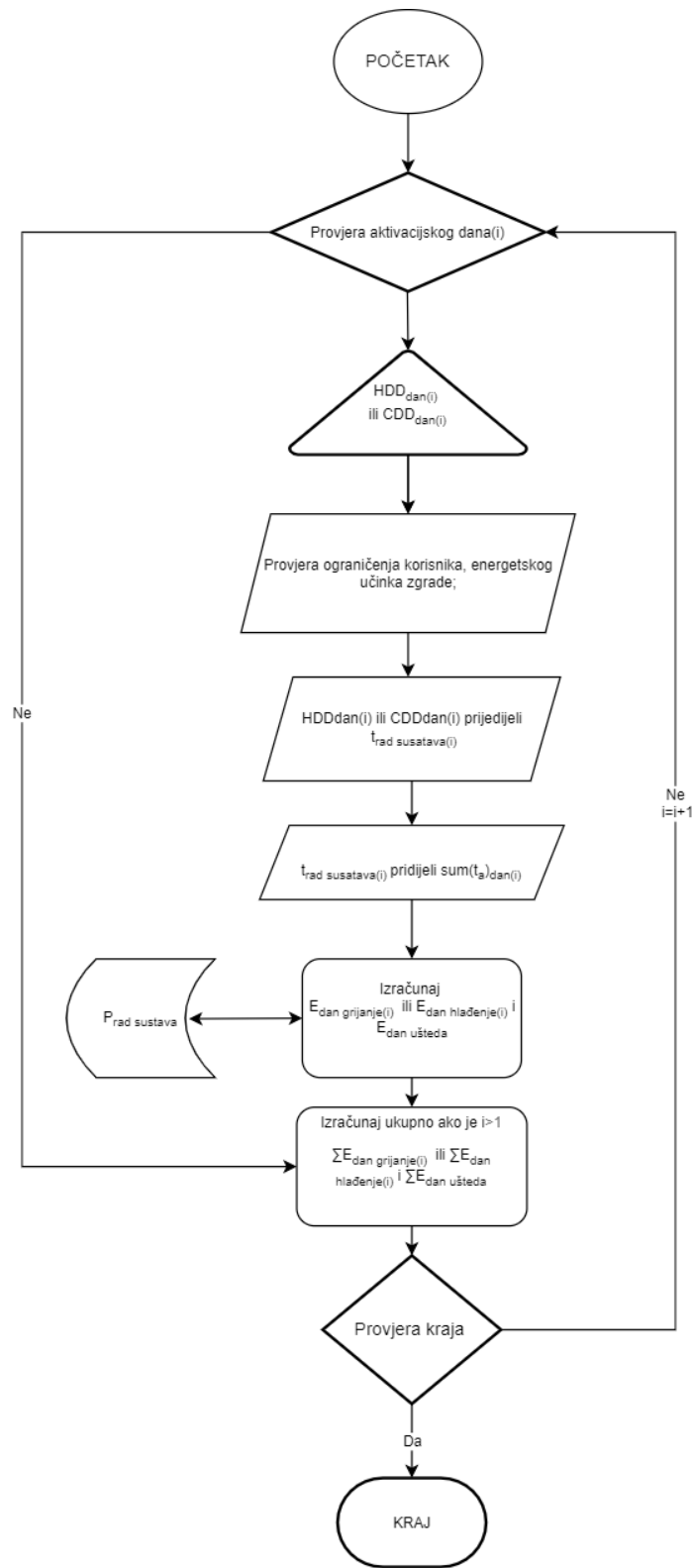
estimacijom u slučaju kućanstava. Sustavi čije je ponašanje jednostavnije procijeniti su konzistentnije prirode, odnosno njihovo paljenje i gašenje je relativno stabilnih karakteristika, što nije slučaj za kućanstva sa sustavom hlađenja prostora koji nije automatiziran i termostatski postavljen. Grubu estimaciju je moguće napraviti, ali primjenjiviji modeli za tu svrhu su stohastički, koji zahtijevaju veću granularnost ulaznih podataka i intenzivniju podatkovnu obradu. Međutim, za početnu estimaciju i procjenu potencijala fleksibilnosti, funkcija sa slike 31 prikazuje dovoljno indikativne karakteristike za slučaj hlađenja.

#### 5.4. Dijagram toka za izračun energetske uštede u okviru modela

Dijagram toka koji prati izrađeni model prikazan je na slici 32. Prvi korak je provjera aktivacijskog dana ili dana gdje se primjenjuje fleksibilnost. Ako se radi o aktivacijskom danu, proces se nastavlja i danu aktivacije dodjeljuje se vrijednost stupnja dana grijanja (HDD) ili (CDD). U praksi, te vrijednosti je moguće izračunati ako je primjerice poznata satna vremenska prognoza za idući dan ili za idućih nekoliko dana.

Treći korak je provjera ograničenja koja su dana od strane korisnika, a mogu se odnositi na želje korisnika da se primjerice aktivacija fleksibilnosti ograniči na određeni period unutar dana, da se prioritizira samodostatnost energije unutar perioda kada kućanstvo proizvodi onoliko energije koliko mu je potrebno da pokrije vlastitu potrošnju i sl. Radi se o ograničenjima koje je u praksi potrebno kontinuirano pratiti kako bi se osigurala točnost procjene.

Četvrti korak je pridijeliti nekom danu sa svojim CDD i HDD odgovarajuće vrijeme rada sustava  $t_{rad\ sustava}$ . Peti korak je pridjeljivanje  $t_{rad\ sustava}$  analiziranom danu, odgovarajući broj aktivacija  $n_{fleksibilnosti}$  i/ili kumulativno vrijeme trajanja aktivacija unutar jednog dana  $t_a$ . Nakon navedenog, a s poznatim  $t_{rad\ sustava}$ ,  $t_a$  i  $P_{el\ kompresor}$ , moguće je izračunati i uštede.



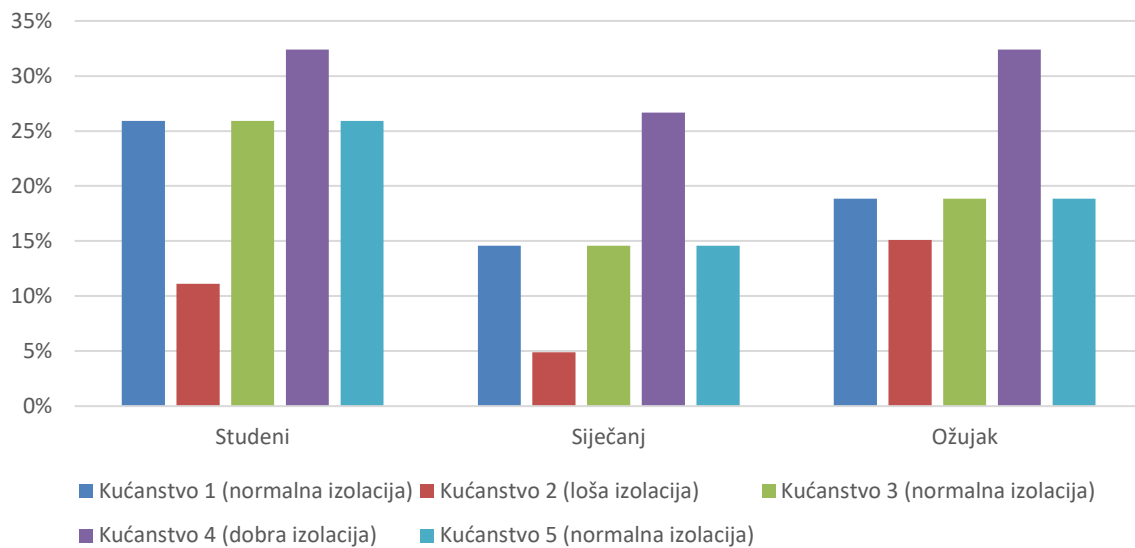
Slika 32 Algoritam za izračun energetske uštede razvijen u okviru modela

## 5.5. Rezultati modela

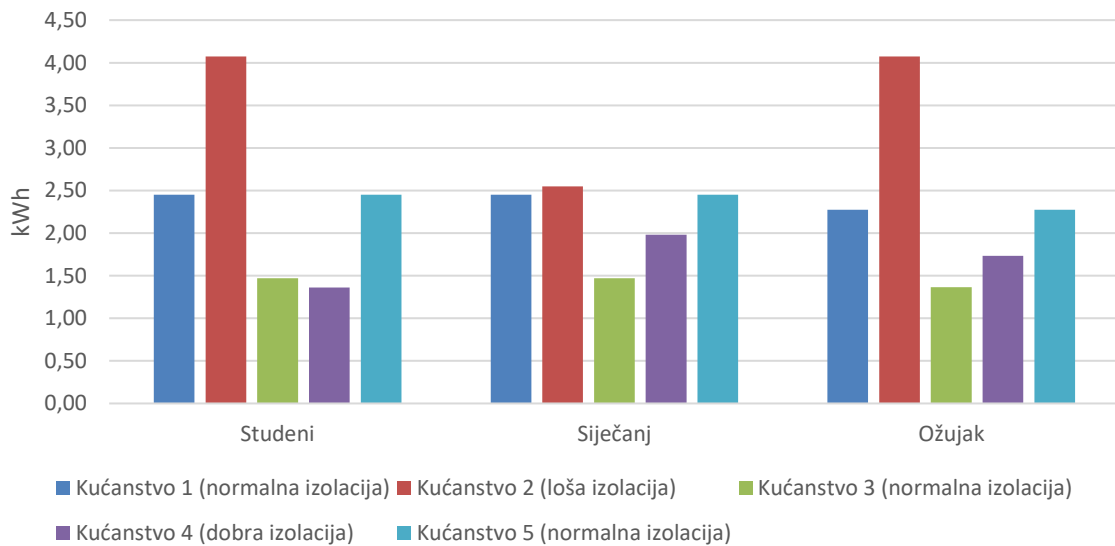
U nastavku su prikazani rezultati koji su dobiveni kroz model agregiranja fleksibilnosti kućanstava u svrhu ostvarivanja energetske uštede.

### 5.5.1. Kvantifikacija energetske uštede

Rezultati izračunatih ušteda za tri karakteristična dana u studenom, siječnju i ožujku prikazani su u nastavku. Kućanstva sa zgradama koje imaju iznimno dobre toplinske karakteristike pokazuju se kao iznimno dobri kandidati za postizanje uštede, ako se uštede promatraju po jedinici dnevne potrošnje za grijanje (slika 33). Ako se promatraju uštede finalne energije, kućanstvo s najlošijom toplinskom izolacijom ima najveće uštede u kWh unutar sezone manjeg intenzivnog grijanja (slika 34). Međutim, u siječnju uštedeni kWh su značajno manji od preostalih mjeseci. Taj rezultat ukazuje na to da algoritam opisan u poglavlju 5.2 za optimiziranje energetske uštede sprječava aktivacije prilikom mogućih dogrijavanja prostora.

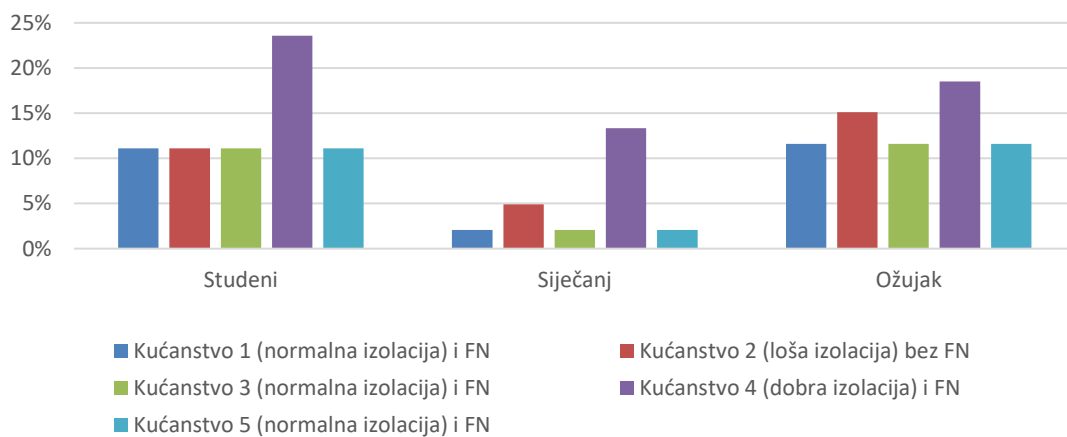


Slika 33 Procijenjene uštede energije za grijanje u tri tipična dana (%)



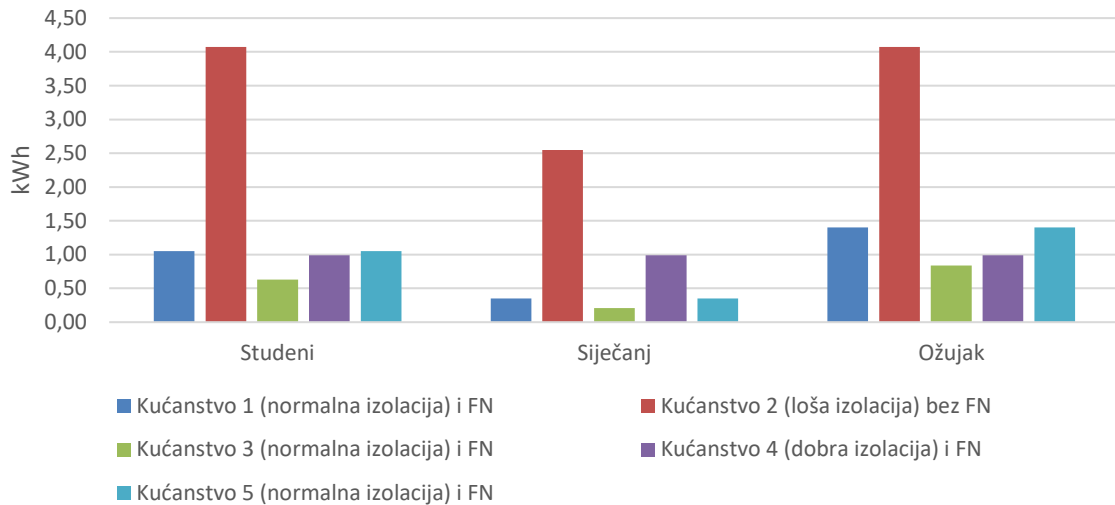
Slika 34 Procijenjene ukupne uštede energije u kWh

U stvarnom slučaju, mogući je scenarij da korisnici žele prioritizirati samodostatnost, odnosno da žele potrošiti čim više energije proizvedene iz vlastitih izvora, što bi u praksi značilo da postavljaju vremenska ograničenja u aktivacijama u periodu kada je proizvodnja iz FN najveća. U praksi to može biti realizirano provjerom omjera samodostatnosti  $\eta_{EE}$  za primjerice dan-unaprijed, a rezultat s tom primijenjenom pretpostavkom prikazani su na slici 35.



Slika 35 Procijenjene uštede energije za grijanje u tri tipična dana (%) s primijenjenim ograničenjima za korištenje FN

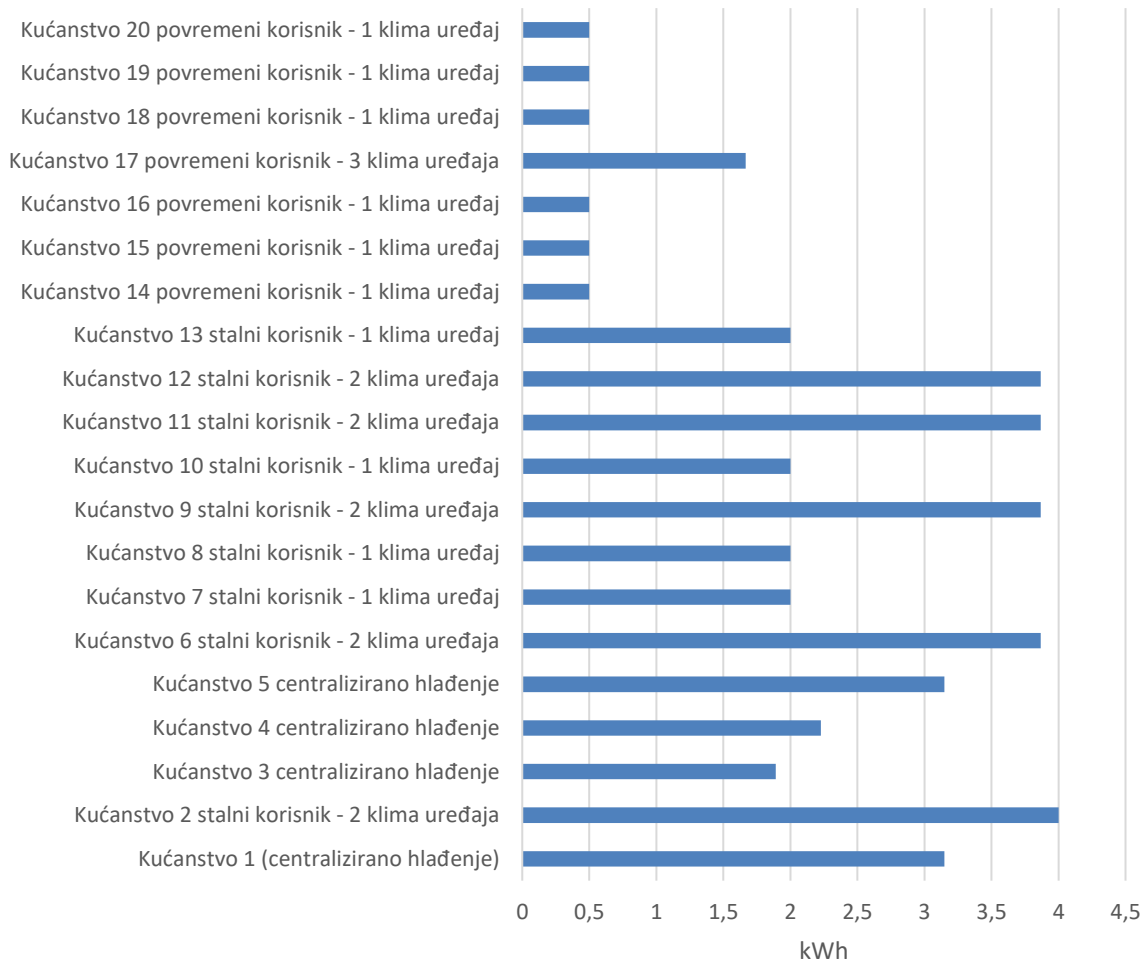
Dobiveni rezultat ukazuje da prioritizacijom samodostatnosti se sve uštede niveliraju, osim kod korisnika s dobrom izolacijom koji i dalje pokazuje najbolje performanse za ostvarivanja ušteda energije naspram ostalih. Taj rezultat ukazuje na to da je aktivno vrijeme rada sustava relativno kontinuirano, tj. veća je toplinska inercija zgrade prema promjenama vanjske temperature, što se očituje i u radu dizalice topline.



Slika 36 Procijenjene ukupne uštede energije u kWh

Ako se promatraju ukupne uštede energije u finalnoj potrošnji (u kWh), riječ je o manjim uštedama (slika 36) koje ipak nisu u potpunosti zanemarive.

Za slučaj hlađenje prikazane su simulirane uštede putem modela za specifičan dan u mjesecu kolovozu kada je pretpostavljeno veće zauzeće svih korisnika u portfelju (slika 37). Osim stalnih korisnika koji koriste centralizirani sustav za hlađenje prostora, za predviđanje trajanja aktivacije sustava nije dovoljno prikupiti mali broj podataka pa su moguće značajne greške. Ipak, model pokazuje da kućanstva s centraliziranim sustavom pokazuju izrazito dobre performanse za postizanje ušteda u finalnoj električnoj energiji koje se mogu kretati između 10 i 20 %.



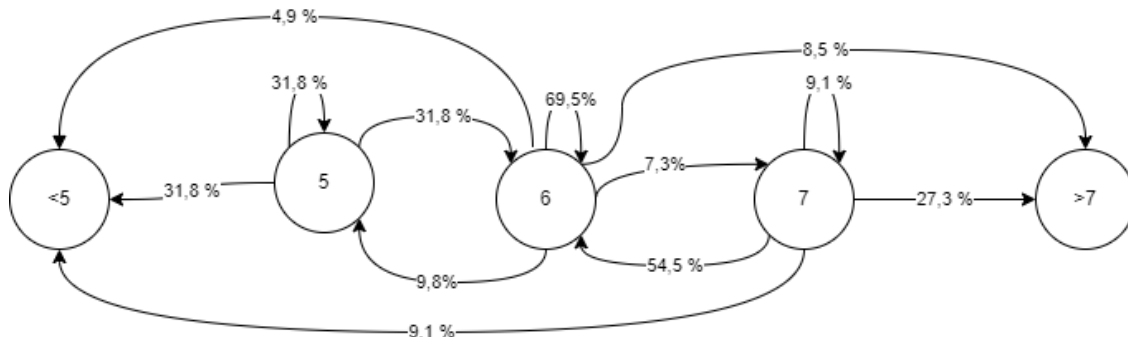
Slika 37 Procijenjene uštede energije za hlađenje u jednom danu u kolovozu

### 5.5.2. Vjerojatnosti aktivacija

Model daje mogućnost kvantifikacije dostupne fleksibilnosti unutar dana ili nekog duljeg perioda, ako su dostupne vrijednosti stupnja dana grijanja ili stupnja dana hlađenja. Međutim, kada bi se promatrao neki dulji period i mogućnost budućih aktivacija, realno je za očekivati da sustav može prijeći u neko drugo stanje ili pak ostati u istom stanju. Iz tog razloga, potrebno je provjeriti ima li niz odnosno  $n_{fleksibilnosti}$  broj aktivacija Markovljevo svojstvo.

Tablica 8 Matrica tranzicije - aktivacije fleksibilnosti za zgrade loše izolacije u sezoni grijanja

Broj intervala		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Broj aktivacija	0	3	4	5	6	7	8	7	6	5	4	3	0
0	0	81%	10%	3%	3%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1	3	22%	44%	33%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	4	23%	0%	23%	23%	15%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3	5	0%	20%	30%	10%	20%	10%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4	6	6%	0%	0%	19%	25%	25%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5	7	0%	0%	5%	9%	18%	32%	32%	5%	0%	0%	0%	0%	0%
6	8	1%	0%	0%	0%	4%	10%	70%	7%	2%	6%	0%	0%	0%
7	7	0%	0%	9%	0%	0%	0%	55%	9%	27%	0%	0%	0%	0%
8	6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	39%	0%	31%	15%	0%	15%	0%
9	5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	6%	13%	19%	38%	19%	0%	6%
10	4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	13%	13%	0%	50%	13%	0%
11	3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	43%	14%	29%	14%
12	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	50%



Slika 38 Markovljev lanac – interval aktivacija za grijanje (loša izolacija)

Iz tablice 8 vidljivo je da svako buduće stanje je neovisno o svakom prijašnjem stanju, što bi značilo da model ima Markovljevo svojstvo. To u praktičnom smislu znaci da ako je model u poznatom danu izračunao da je  $n_{fleksibilnosti}$  8, u idućem danu možemo očekivati 8 aktivacija s vjerojatnošću od 70%. Intervali su napravljeni jer za slučaj grijanja jer povećanjem  $t_{rad}$  sustava, opada broj aktivacija  $n_{fleksibilnost}$  (vidi slike 38). Za preostale slučaje je također provjereno Markovljevo svojstvo (tablice 9, 10 i 11).

Tablica 9 Matrica tranzicije - aktivacije fleksibilnosti za zgrade normalne izolacije u sezoni  
grijanja

Broj intervala		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Broj aktivacija	0	3	4	5	6	7	8	7	6	5	0
0	0	83%	8%	6%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1	3	36%	18%	27%	9%	9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	4	8%	23%	23%	23%	15%	0%	8%	0%	0%	0%	0%
3	5	5%	5%	11%	37%	21%	21%	0%	0%	0%	0%	0%
4	6	0%	4%	8%	17%	33%	29%	8%	0%	0%	0%	0%
5	7	2%	0%	0%	7%	18%	47%	16%	11%	0%	0%	0%
6	8	0%	0%	2%	0%	2%	28%	57%	11%	0%	0%	0%
7	7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	28%	52%	17%	0%	3%
8	6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	21%	50%	14%	0%
9	5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	67%	0%	0%
10	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	50%

Tablica 10 Matrica tranzicije - aktivacije fleksibilnosti za zgrade loše izolacije u sezoni  
grijanja

Broj intervala		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Broj aktivacija	0	1	2	3	4	5	6	7	8	7	0
0	0	84%	5%	5%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1	1	43%	14%	29%	0%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	2	9%	0%	46%	9%	9%	18%	0%	0%	9%	0%	0%
3	3	20%	20%	10%	30%	10%	10%	0%	0%	0%	0%	0%
4	4	0%	0%	0%	14%	29%	29%	21%	7%	0%	0%	0%
5	5	0%	5%	0%	9%	18%	32%	18%	14%	5%	0%	0%
6	6	0%	0%	0%	0%	9%	36%	18%	27%	9%	0%	0%
7	7	3%	0%	0%	0%	3%	0%	26%	31%	37%	0%	0%
8	8	0%	0%	2%	0%	0%	0%	3%	21%	65%	8%	2%
9	7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	42%	33%	25%
10	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	17%	50%	33%



Tablica 11 Matrica tranzicije - aktivacije za hlađenje

<i>Broj intervala</i>		0	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Broj aktivacija</i>		0	4	5	6	7	8	9	9	0
0	0	80%	10%	2%	2%	2%	2%	0%	2%	0%
1	4	67%	0%	17%	0%	0%	0%	17%	0%	0%
2	5	57%	0%	29%	0%	0%	14%	0%	0%	0%
3	6	10%	0%	10%	50%	20%	10%	0%	0%	0%
4	7	0%	0%	25%	25%	0%	25%	25%	0%	0%
5	8	0%	0%	0%	0%	9%	36%	27%	9%	18%
6	9	0%	0%	11%	0%	0%	22%	0%	11%	56%
7	9	0%	0%	0%	0%	0%	20%	20%	0%	60%
8	0	2%	2%	0%	6%	0%	0%	6%	4%	80%

## 6. ZNANSTVENI DOPRINOS I NASTAVAK ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju dan je pregled ostvarenog znanstvenog doprinosa kroz pregled sadržaja rada i objavljenih radova iz područja istraživanja. Dodatno, dane su smjernice za nastavak istraživanja.

### 6.1. Izvorni znanstveni doprinos

- *Model agregiranja fleksibilnosti kućanstava i određivanje ključnih indikatora za praćenje i verifikaciju energetske ušteda*

U radu je opisan model agregiranja fleksibilnosti kućanstva (poglavljima 4 i 5), a pristup postavljanja modela prikazan je u poglavljima 4.5, 5.1, 5.2, 5.3 i 5.4. Za potrebe postavljanja modela predloženo je mapiranje karakterističnih obrazaca potrošnje (poglavljima 4.5.2 i 4.5.3). Rezultati predloženog modela (poglavljem 5.5) prikazuje dobre performanse kućanstava za postizanje ušteda energije kroz aktivaciju fleksibilnosti potrošnje. Indikatori za praćenje i verifikaciju koji bi omogućili praćenje energetske ušteda u dinamičkom okruženju, a koje su rezultat kratkotrajnih aktivacija fleksibilnosti potrošnje u dinamičkom okruženju, opisani su u poglavlju 4.6. Metodološki pristup je prikazan i u okviru znanstvenog rada [82], a mogućnost uspostave indikatora za praćenje i verifikaciju energetske ušteda obrađen je u okviru rada [33].

- *Metoda kvantifikacije fleksibilnosti kućanstava uz minimalno dostupan skup ulaznih podataka*

Rad predlaže metodu za kvantifikaciju fleksibilnosti kućanstava (poglavljem 5) koja podrazumijeva tipične obrasce potrošnje kućanstava, ovisnost njihove potrošnje u ključnim parametrima i uspostavljanje regresijskih modela (5.3). Također, predviđa mogućnost uspostavljanja ograničenja koje su zadane od samih korisnika u okviru algoritma koji je prikazan u poglavlju 5.2. U dinamičkom okruženju, uz praćenje ključnih indikatora koji su prepoznati u poglavlju 4.6 i nakon uspostavljenih regresijskih modela, moguće je identificirati energetske uštede koje su dobivene aktivacijom fleksibilnosti potrošnje.

## 6.2. Smjernice nastavka istraživanja

Nastavak istraživanja može voditi u dva smjera. Prvi smjer bio bi nadogradnja modela za dinamičnije okruženje gdje se očekuje veća granularnost ulaznih podataka, čime bi se omogućila bolja kalibracija postavljenog modela i verificiranje njegove stabilnosti u stvarnom okruženju. Drugi smjer je izgradnja zajedničkog informacijskog modela za eksplicitno upravljanje potrošnjom u kućanstvima ili semantičke ekstenzije postojećim komunikacijskim protokolima s naglaskom na semantičku interoperabilnost. Na taj način bi se omogućilo da se praćenjem korelacijskih odnosa između „imovina“ u kućanstvu i ključnih parametara koji utječu na potrošnju postigne jednostavnija kvantifikacija energetske uštede.

## 7. DISKUSIJA

Postavljanje programa fleksibilnosti potrošnje koji aktivira izvore fleksibilnosti unutar kućanstva i pritom teži k ostvarivanju energetske ušteda je kompleksan zadatak. Uobičajeno, agregator fleksibilnosti kroz npr. tržište pomoćnih usluga optimizira dostupan portfelj izvora fleksibilnosti svojih korisnika ili dionika da bi u najboljoj mjeri odgovorio na potražnju operatora. Implikacija jasno postavljenih optimizacijskih ciljeva agregatora fleksibilnosti nije zanemariv čimbenik za uspješno postavljanje poslovnog modela.

Ako se promatra težnja prema demokratizaciji EES-a, onda se u narativ uvode tzv. krajnji korisnici mreže koji su do sada imali ulogu relativno pasivnih promatrača tržišta električne energije. Pitanje aktivnog uključivanja potrošača, odnosno krajnjih korisnika mreže, na tržište električne energije nije trivijalno i ne može se očekivati da će digitalizacija samostalno riješiti pitanje uključivanja potrošača, čak i ako se uspostave svi regulatorni i tehnički preduvjeti za njihovo uključivanje na tržište.

Sinergijskim djelovanjem energetske ušteda i aktivacijom fleksibilnosti potrošnje moglo bi se djelomično riješiti pitanje prepoznavanja stvarne koristi od sudjelovanja u programima fleksibilnosti potrošnje. Krajnji potrošači već dugi niz godina prepoznaju prednosti energetske učinkovitosti. Aktivnim kampanjama populariziraju se prednosti uvođenja energetske oznake na uređajima električne energije, energetske obnove zgrade i općenito poboljšanja učinkovitosti sustava grijanja, hlađenja itd. Korištenje motivacijskog faktora postizanja ušteda energije u krajnjoj potrošnji u svrhu uključivanja korisnika u programe fleksibilnosti potrošnje nije zanemariv.

U poslovnom kontekstu agregatora fleksibilnosti, sudjelovanje agregatora na tržištu energetske ušteda moglo bi pridonijeti diverzifikaciji njegovog prihoda i održivosti poslovnog modela. Problematike niske dostupnosti ulaznih podataka i njihove ograničene granularnosti otežava procjenu takvog potencijala. Pritom, ne treba zanemariti činjenicu da su agregatori novi subjekti na tržištu i nije realno očekivati da će potrošači odmah prepoznati njihove prednosti i omogućiti im pristup njihovim podacima o potrošnji kroz aktivne kampanje mjerenja.

Predloženi model olakšava preliminarnu procjenu učinka takvog programa s minimalno prikupljenim ulaznim podacima. Ovaj model daje mogućnost da se kvalitativnom i kvantitativnom

analizom te obradom ulaznih podataka preliminarno procijeni potencijal fleksibilnosti potrošnje u kontekstu osiguravanja trajnih ušteda energije. Grupiranjem korisnika unutar homogenih skupina, koje su određene prepoznatim parametrima, moguće je predvidjeti ponašanje i ostalih korisnika unutar veće skupine.

Predloženi model omogućava kvantifikaciju potencijala fleksibilnosti potrošnje analizom ključnih parametara koji utječu na potrošnju izvora fleksibilnosti, a pogodni su kandidati za postizanja ušteda energije. Razvijeni model je prilagođen tipičnim obrascima korištenja kućanstava i potrošnje u mediteranskim zemljama gdje je dostupnost daljinskog grijanja uobičajeno manjkava. Rezultati koji su dobiveni iz modela gdje se prioritiziraju energetske uštede izrazito su povoljni za ona kućanstva čije zgrade pokazuju bolja energetska svojstva. Također, ta kućanstva pokazuju se kao dobri kandidati za relativno kontinuirani broj aktivacija fleksibilnosti tijekom dužeg vremenskog perioda (od listopada do travnja).

Predviđanje mogućih aktivacija fleksibilnosti za kućanstva (samostojeće zgrade) u sezoni hlađenja je puno kompleksnije, pogotovo ako se promatra u okolini gdje svi korisnici nisu trajno nastanjeni u svojim kućanstvima, već ih koriste sezonski odnosno periodično. Ako korisnici kontinuirano koriste prostor i sustave centraliziranog hlađenja, jednostavnije je uspostaviti regresijski model između ključnih parametara koji utječu na njihov rad.

Važno je naglasiti da ovaj model nije zamjena za modele koji ocjenjuju toplinska svojstva zgrade, niti mu je cilj modeliranje toplinskog svojstva zgrade. U okviru modela, uspostavljena je korelacija između krajnje potrošnje električne energije i karakteristika ovojnica zgrade koja je ocijenjena preliminarnom analizom kvalitativnih podataka koji su prikupljeni putem upitnika. Također, procjene potrošnje električne energije dobivene ovom analizom nisu zamjena za izradu nezavisnih krivulja opterećenja, budući da se ovdje ne analizira ukupno opterećenje tijekom dana ili sata, već se estimira potrošnja izvora fleksibilnosti u kućanstvima.

Da bi se program eksplicitnog upravljanja potrošnjom u kućanstvima, koji ujedno osigurava postizanje ušteda energije u krajnjoj potrošnji mogao u praksi uspostaviti, nužno je intenzivno podatkovno poslovanje za agregatora fleksibilnosti.

## 8. ZAKLJUČAK

Agregator koji objedinjuje fragmentirane izvore fleksibilnosti privatnih korisnika ima jedan od najzahtjevnijih zadataka u EES-u. Treba uspostaviti sociološko-motivacijski i tehnološko-informacijski okvir između sebe i svojih korisnika, mora biti spreman na podatkovno intenzivno poslovanje, mora rješavati niz regulatornih, ugovornih i ostalih pitanja koji se tiču intervencija u sustave, zaštitu privatnosti itd. Mogućnost uspostavljanja programa aktivnog upravljanja potrošnjom u kućanstvima koji bi omogućio dobivanje energetske ušteda i njihovu verifikaciju kroz podatkovno intenzivno poslovanje agregatora fleksibilnosti je izvedivo, ali složeno u praksi.

Za kvantifikaciju ušteda energije potrebno je procijeniti potrošnju koja bi se dogodila bez intervencija mjera energetske učinkovitosti. Procjenu je moguće napraviti identifikacijom ključnih parametara te uspostavom modela koji omogućava predviđanje obrazaca potrošnje u nekom vremenskom intervalu. Ključne parametre potrebno je identificirati kvalitativnom i kvantitativnom analizom prikupljenih podataka. Za uspostavu uspješnog programa fleksibilnosti potrošnje u kućanstvima potrebno je uzeti u obzir društveno-ekonomske, klimatološke, sezonske i ostale prilike na nekom području, dostupnost energenata i mogućnosti vlastite proizvodnje energije itd.

Da bi se uštede energije mogle pratiti kroz kratkotrajne aktivacije fleksibilnosti potrošnje, potrebno je ne samo prikupiti podatke s odgovarajućom granularnošću, već i osigurati ispravnu semantičku interpretaciju prenesenih poruka. Ključni uvjeti za uspostavljanje programa fleksibilnosti potrošnje, koji kroz kratkotrajne intervencije na kućnim uređajima osigurava energetske uštede, su uspostava standardizirane funkcionalne arhitekture upravljanja, razmjene, pohrane podataka i ispravne semantičke interpretacije prikupljenih podataka. Također, ključna je identifikacija promjena i pravovremena kalibracija programa aktivacija s obzirom na promjenu želja korisnika, vremenske uvjete i sl.

Poslovni model koji bi omogućio sinergiju fleksibilnosti potrošnje i energetske ušteda olakšao bi prvenstveno pristup agregatoru fleksibilnosti samim korisnicima i omogućio bi tvrtkama koji se tradicionalno bave ostvarivanjem energetske učinkom bolje praćenje ostvarivanja energetske ušteda.

Rezultati koji su dobiveni ovim istraživanjem ukazuju da je poželjno sinergijski promatrati energetske učinkovitost zgrade i fleksibilnost potrošnje koja se manifestira promjenom radne točke sustava ili uređaja s izravnim utjecajem na komfor korisnika. Za uspješno postavljanje programa aktivacija, potrebno je ta dva segmenta sinergijski pratiti. Isto tako, potrebno je intervencije energetske učinkovitosti u kućanstvima staviti u prvi plan, primjerice obnovom ovojnice, nabavkom energetski učinkovitih uređaja i sl., a ne izolirano promatrati mogućnosti aktivacija fleksibilnosti potrošnje za ostvarivanje tržišnih ciljeva koji mogu biti u koliziji s ostvarivanjem energetske uštede.

## LITERATURA

- [1] Directorate-General for Energy (European Commission), *Clean energy for all Europeans*. LU: Publications Office of the European Union, 2019. Pristupljeno: 01. ožujak 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/9937>
- [2] *Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance.)*, sv. 328. 2018. Pristupljeno: 01. ožujak 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2002/oj/eng>
- [3] *Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (Text with EEA relevance.)*, sv. 158. 2019. Pristupljeno: 01. ožujak 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/eng>
- [4] K. Wohlfarth, E. Worrell, i W. Eichhammer, „Energy efficiency and demand response – two sides of the same coin?“, *Energy Policy*, sv. 137, str. 111070, velj. 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111070.
- [5] European Commission, „Energy efficiency first principle“. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-first-principle\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-first-principle_en) (pristupljeno 08. svibanj 2022.).
- [6] J. Zapata Riveros, M. Kubli, i S. Ulli-Ber, „Prosumer communities as strategic allies for electric utilities: Exploring future decentralization trends in Switzerland“, *Energy Research & Social Science*, sv. 57, str. 101219, stu. 2019, doi: 10.1016/j.erss.2019.101219.
- [7] D. Arnone *i ostali*, „A Methodology for Exploiting Smart Prosumers’ Flexibility in a Bottom-Up Aggregation Process“, *Applied Sciences*, sv. 12, izd. 1, Art. izd. 1, sij. 2022, doi: 10.3390/app12010430.
- [8] Directorate-General for Budget (European Commission), *The EU’s 2021-2027 long-term budget and NextGenerationEU: facts and figures*. LU: Publications Office of the European Union, 2021. Pristupljeno: 22. srpanj 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <https://data.europa.eu/doi/10.2761/808559>
- [9] *Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC Text with EEA relevance*, sv. 315. 2012. Pristupljeno: 22. srpanj 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj/eng>
- [10] *Zakon o tržištu električne energije NN 111/21*. Pristupljeno: 17. svibanj 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <https://zakon.hr/z/377/Zakon-o-tr%C5%BEi%C5%A1tu-elektri%C4%8Dne-energije>



- [11] *Zakon o energetskej učinkovitosti NN 127/14, 116/18, 25/20, 32/21, 41/21*. Pristupljeno: 17. svibanj 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <https://zakon.hr/z/747/Zakon-o-energetskoj-u%C4%8Dinkovitosti>
- [12] ENTSO-E, „Market Design For Demand Response“. ENTSO-E, 2015. [Na internetu]. Dostupno na: [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/entsoe\\_pp\\_dsr\\_web.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/entsoe_pp_dsr_web.pdf)
- [13] „Javni poziv za osiguravanje rezerve radne snage tercijarne regulacije upravljivom potrošnjom“. <https://www.hops.hr/obavijesti/javni-poziv-za-osiguravanje-rezerve-radne-snage-tercijarne-regulacije-upravljivom-potrosnjom> (pristupljeno 03. lipanj 2022.).
- [14] *Mrežna pravila prijenosnog sustava NN 67/2017*. 2017, str. 105. Pristupljeno: 03. lipanj 2022. [Na internetu]. Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017\\_07\\_67\\_1585.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_07_67_1585.html)
- [15] „Frequency Containment Reserves (FCR)“. [https://preview.entsoe.eu/network\\_codes/eb/fcr/](https://preview.entsoe.eu/network_codes/eb/fcr/) (pristupljeno 03. lipanj 2022.).
- [16] K. Kotilainen, S. J. Mäkinen, i P. Järventausta, „Understanding prosumers’ intrinsic and extrinsic motivations to become active participants in smart grid innovation ecosystem“, u *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, lis. 2016, str. 1–6. doi: 10.1109/ISGTEurope.2016.7856261.
- [17] *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (Text with EEA relevance.)*, sv. 328. 2018. Pristupljeno: 01. ožujak 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/eng>
- [18] B. Ramanathan i V. Vittal, „A Framework for Evaluation of Advanced Direct Load Control With Minimum Disruption“, *IEEE Transactions on Power Systems*, sv. 23, izd. 4, str. 1681–1688, stu. 2008, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2004732.
- [19] C. Schellenberg, J. Lohan, i L. Dimache, „Comparison of metaheuristic optimisation methods for grid-edge technology that leverages heat pumps and thermal energy storage“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 131, str. 109966, lis. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109966.
- [20] F. Shariatzadeh, P. Mandal, i A. K. Srivastava, „Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 45, izd. C, str. 343–350, 2015.
- [21] H. Keko, L. Luttenberger, L. Babić, i S. Sučić, „Semantika podataka u arhitekturi za pohranu i upravljanje fleksibilnom potrošnjom kod krajnjih korisnika“, Opatija, Croatia, 08. studeni 2020. Pristupljeno: 19. veljača 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <https://zenodo.org/record/4627691>
- [22] H. C. Curtius, K. Künzel, i M. Looock, „Generic customer segments and business models for smart grids“, *markt*, sv. 51, izd. 2, str. 63–74, kol. 2012, doi: 10.1007/s12642-012-0076-0.

- [23] Q. Wang, C. Zhang, Y. Ding, G. Xydis, J. Wang, i J. Østergaard, „Review of real-time electricity markets for integrating Distributed Energy Resources and Demand Response“, *Applied Energy*, sv. 138, str. 695–706, sij. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.048.
- [24] P. Alstone *i ostali*, „2025 California Demand Response Potential Study - Charting California’s Demand Response Future. Final Report on Phase 2 Results“, 1421800, ožu. 2017. doi: 10.2172/1421800.
- [25] B. Gerke *i ostali*, „The California Demand Response Potential Study, Phase 3: Final Report on the Shift Resource through 2030“, srp. 2020, doi: 10.20357/B7MS40.
- [26] „Guidelines for Monitoring, Evaluation, Reporting, Verification, and Certification of Energy Efficiency Projects for Climate Change Mitigation | Energy Technology Area“. <https://energy.lbl.gov/publications/guidelines-monitoring-evaluation-0> (pristupljeno 11. lipanj 2022.).
- [27] *Pravilnik o sustavu za praćenje, mjerenje i verifikaciju ušteda energije NN 98/2021*. 2021, str. 4. Pristupljeno: 11. lipanj 2022. [Na internetu]. Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021\\_09\\_98\\_1772.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_09_98_1772.html)
- [28] T. E3P, „ESCo - Monitoring and Verification“, 23. prosinac 2015. <https://e3p.jrc.ec.europa.eu/articles/monitoring-and-verification> (pristupljeno 11. lipanj 2022.).
- [29] „Monitoring and Evaluation of Energy Efficiency Programs“, 01. listopad 2018. <https://www.usaid.gov/energy/efficiency/developing-programs/evaluation> (pristupljeno 12. lipanj 2022.).
- [30] Natural Resources Canada’s CanmetENERGY, „Overview of Different Measurement and Verification (M&V) Protocols“, Econoler, 2008-069\_TR\_424-CONOPT, 2008. [Na internetu]. Dostupno na: [https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/NRCan\\_MV\\_Overview\\_Report.pdf#:~:text=Developed%20by%20a%20volunteer%20committee%20under%20the%20U.S.,because%20of%20the%20considerable%20uncertainty%20about%20energy%20savings.](https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/NRCan_MV_Overview_Report.pdf#:~:text=Developed%20by%20a%20volunteer%20committee%20under%20the%20U.S.,because%20of%20the%20considerable%20uncertainty%20about%20energy%20savings.)
- [31] D. Tanguay, „International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP)“, *Efficiency Valuation Organization (EVO)*. <https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp> (pristupljeno 12. lipanj 2022.).
- [32] M. L. Goldberg i C. Goldman, „Measurement and Verification for Demand Response“, Electricity Markets and Policy Group, Energy Analysis and Environmental Impacts Division, 2013. [Na internetu]. Dostupno na: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/napdr-measurement-and-verification.pdf>
- [33] L. Luttenberger Marić, H. Keko, i S. Sučić, „Semantic alignment in monitoring and verification of energy savings achieved by demand response flexibility programs“, *45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, str. 55–59, 2022, doi: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803329.

- [34] T. E3P, „Energy Performance Contracting“, 23. prosinac 2013. <https://e3p.jrc.ec.europa.eu/articles/energy-performance-contracting> (pristupljeno 22. lipanj 2022.).
- [35] „ESCO contracts – Energy Service Companies (ESCOs) – Analysis“, *IEA*. <https://www.iea.org/reports/energy-service-companies-escos-2/esco-contracts> (pristupljeno 22. lipanj 2022.).
- [36] „ESCO Industry Trends & Analysis | Electricity Markets and Policy Group“. <https://emp.lbl.gov/projects/espc-trends-and-analysis> (pristupljeno 22. lipanj 2022.).
- [37] M. Santini, D. Tzani, S. Thomas, V. Stavarakas, J. Rosenow, i A. Celestino, „Experience and Lessons Learned from Pay-for-Performance (P4P) pilots for Energy Efficiency“, Zenodo, lip. 2020. doi: 10.5281/zenodo.3887823.
- [38] D. Tzani, V. Stavarakas, M. Santini, S. Thomas, J. Rosenow, i A. Flamos, „Pioneering a performance-based future for energy efficiency: Lessons learnt from a comparative review analysis of pay-for-performance programmes“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 158, str. 112162, tra. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112162.
- [39] G. Gordon, C.-H. Bourgois, S. Wuyts, i J. Coolen, „Guidelines for the design of P4P schemes“, ožu. 2022, doi: 10.5281/zenodo.6367999.
- [40] Grillone, „Proposal on the specifications for P4P project data“, ožu. 2022, doi: 10.5281/zenodo.6367991.
- [41] R. Jackson, E. Zhou, i J. Reyna, „Building and grid system benefits of demand flexibility and energy efficiency“, *Joule*, sv. 5, izd. 8, str. 1927–1930, kol. 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.08.001.
- [42] „Obligation schemes and alternative measures“. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/obligation-schemes-and-alternative-measures\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/obligation-schemes-and-alternative-measures_en) (pristupljeno 26. lipanj 2022.).
- [43] J.-S. Broc, W. Stańczyk, i B. Reidlinger, „Snapshot of Energy Efficiency Obligation Schemes in Europe (as of end 2019) – ensmov.eu“. ENSMOV reoirt, 2020. Pristupljeno: 26. lipanj 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <https://ensmov.eu/snapshot-of-energy-efficiency-obligation-schemes-in-europe-as-of-end-2019/>
- [44] Ministarstvo gospodarstva Republike Hrvatske, „Metodologija za sustav obveze energetske učinkovitosti u skladu s člankom 7. i člankom 20. stavkom 6. te prilogom V. Direktive 2012/27/EU Europskog parlamenta i Vijeća od 25. listopada 2012. o energetske učinkovitosti“. 2014. [Na internetu]. Dostupno na: [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2014-11/article7\\_hr\\_croatia\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2014-11/article7_hr_croatia_0.pdf)
- [45] M. Kubli i P. Canzi, „Business strategies for flexibility aggregators to steer clear of being “too small to bid”“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 143, str. 110908, lip. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110908.

- [46] G. T. Costanzo, G. Zhu, M. F. Anjos, i G. Savard, „A System Architecture for Autonomous Demand Side Load Management in Smart Buildings“, *IEEE Transactions on Smart Grid*, sv. 3, izd. 4, str. 2157–2165, pros. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2217358.
- [47] A. Arteconi i K. Bruninx, „5.4 Energy Reliability and Management“, u *Comprehensive Energy Systems*, I. Dincer, Ur. Oxford: Elsevier, 2018, str. 134–165. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00513-7.
- [48] L. Mendicino i ostali, „DSO Flexibility Market Framework for Renewable Energy Community of Nanogrids“, *Energies*, sv. 14, izd. 12, Art. izd. 12, sij. 2021, doi: 10.3390/en14123460.
- [49] EDSO, „Flexibility: The role of DSOs in tomorrow’s electricity market“, 2014.
- [50] P. Palensky i D. Dietrich, „Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads“, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, sv. 7, izd. 3, str. 381–388, kol. 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2158841.
- [51] M. Gough, S. F. Santos, M. Javadi, R. Castro, i J. P. S. Catalão, „Prosumer Flexibility: A Comprehensive State-of-the-Art Review and Scientometric Analysis“, *Energies*, sv. 13, izd. 11, Art. izd. 11, sij. 2020, doi: 10.3390/en13112710.
- [52] S. S. Torbaghan, N. Blaauwbroek, P. Nguyen, i M. Gibescu, „Local market framework for exploiting flexibility from the end users“, u *2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, lip. 2016, str. 1–6. doi: 10.1109/EEM.2016.7521304.
- [53] M. Neukomm, V. Nubbe, i R. Fares, „Grid-Interactive Efficient Buildings“, U.S. Dept. of Energy (USDOE), Washington DC (United States); Navigant Consulting, Inc., Chicago, IL (United States), DOE/ EE-1968, tra. 2019. doi: 10.2172/1508212.
- [54] P. Siano, „Demand response and smart grids—A survey“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 30, str. 461–478, velj. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.10.022.
- [55] R. Smale, B. van Vliet, i G. Spaargaren, „When social practices meet smart grids: Flexibility, grid management, and domestic consumption in The Netherlands“, *Energy Research & Social Science*, sv. 34, str. 132–140, pros. 2017, doi: 10.1016/j.erss.2017.06.037.
- [56] P. Bradley, M. Leach, i J. Torriti, „A review of the costs and benefits of demand response for electricity in the UK“, *Energy Policy*, sv. 52, str. 312–327, sij. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.09.039.
- [57] A. Kowalska-Pyzalska, „What makes consumers adopt to innovative energy services in the energy market? A review of incentives and barriers“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 82, str. 3570–3581, velj. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.103.
- [58] D. Xenias, C. J. Axon, L. Whitmarsh, P. M. Connor, N. Balta-Ozkan, i A. Spence, „UK smart grid development: An expert assessment of the benefits, pitfalls and functions“, *Renewable Energy*, sv. 81, str. 89–102, ruj. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.03.016.
- [59] P. Connor i O. Fitch-Roy, „Chapter 14 - The Socio-Economic Challenges of Smart Grids“, u *Pathways to a Smarter Power System*, A. Taşçıkaraoğlu i O. Erdinç, Ur. Academic Press, 2019, str. 397–413. doi: 10.1016/B978-0-08-102592-5.00014-4.

- [60] J. Viitanen i R. Kingston, „Smart Cities and Green Growth: Outsourcing Democratic and Environmental Resilience to the Global Technology Sector“, *Environ Plan A*, sv. 46, izd. 4, str. 803–819, tra. 2014, doi: 10.1068/a46242.
- [61] J. C. Stephens, „Energy Democracy: Redistributing Power to the People Through Renewable Transformation“, *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, sv. 61, izd. 2, str. 4–13, ožu. 2019, doi: 10.1080/00139157.2019.1564212.
- [62] R. Smale i S. Kloppenburg, „Platforms in Power: Householder Perspectives on the Social, Environmental and Economic Challenges of Energy Platforms“, *Sustainability*, sv. 12, izd. 2, Art. izd. 2, sij. 2020, doi: 10.3390/su12020692.
- [63] A. L. Klopčič, J. Hojnik, i Š. Bojnec, „What is the state of development of retail electricity markets in the EU?“, *The Electricity Journal*, sv. 35, izd. 3, str. 107092, tra. 2022, doi: 10.1016/j.tej.2022.107092.
- [64] „Prices and factors affecting prices - U.S. Energy Information Administration (EIA)“. <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/prices-and-factors-affecting-prices.php> (pristupljeno 20. srpanj 2022.).
- [65] A. L. Klopčič, J. Hojnik, i Š. Bojnec, „Do increased cross-border flow and greater competition in the market lead to lower electricity prices for end-consumers?“, *The Electricity Journal*, sv. 35, izd. 6, str. 107146, srp. 2022, doi: 10.1016/j.tej.2022.107146.
- [66] F. Gangale, J. Vasiljevska, C. F. Covrig, A. Mengolini, i G. Fulli, „Smart grid projects outlook 2017: facts, figures and trends in Europe“. EUR 28614 EN, 2017. [Na internetu]. Dostupno na: doi:10.2760/15583
- [67] „Electricity market indicators“. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_market\\_indicators](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_market_indicators) (pristupljeno 20. srpanj 2022.).
- [68] „Electricity price statistics“. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_price\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics) (pristupljeno 19. srpanj 2022.).
- [69] H. Li, Z. Wang, T. Hong, i M. A. Piette, „Energy flexibility of residential buildings: A systematic review of characterization and quantification methods and applications“, *Advances in Applied Energy*, sv. 3, str. 100054, kol. 2021, doi: 10.1016/j.adapen.2021.100054.
- [70] K. Ganesan, J. T. Saraiva, i R. J. Bessa, „Functional model of residential consumption elasticity under dynamic tariffs“, *Energy and Buildings*, sv. 255, str. 111663, sij. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111663.
- [71] C. Goebel, „On the business value of ICT-controlled plug-in electric vehicle charging in California“, *Energy Policy*, sv. 53, str. 1–10, velj. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.053.
- [72] H. Dagdougui, A. Ouammi, i R. Sacile, „Chapter 8 - Towards a Concept of Cooperating Power Network for Energy Management and Control of Microgrids“, u *Microgrid*, M. S. Mahmoud, Ur. Butterworth-Heinemann, 2017, str. 231–262. doi: 10.1016/B978-0-08-101753-1.00008-5.

- [73] „Smart readiness indicator“. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en) (pristupljeno 13. svibanj 2022.).
- [74] C. A. Correa-Florez, A. Michiorri, i G. Kariniotakis, „Optimal Participation of Residential Aggregators in Energy and Local Flexibility Markets“, *IEEE Transactions on Smart Grid*, sv. 11, izd. 2, str. 1644–1656, ožu. 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2941687.
- [75] O. Agbonaye, P. Keatley, Y. Huang, O. O. Ademulegun, i N. Hewitt, „Mapping demand flexibility: A spatio-temporal assessment of flexibility needs, opportunities and response potential“, *Applied Energy*, sv. 295, str. 117015, kol. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117015.
- [76] F. Lezama, J. Soares, B. Canizes, i Z. Vale, „Flexibility management model of home appliances to support DSO requests in smart grids“, *Sustainable Cities and Society*, sv. 55, str. 102048, tra. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102048.
- [77] D. Ribó-Pérez, M. Heleno, i C. Álvarez-Bel, „The flexibility gap: Socioeconomic and geographical factors driving residential flexibility“, *Energy Policy*, sv. 153, str. 112282, lip. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112282.
- [78] H. Keko, L. Babić, S. Sučić, i L. Luttenberger, „Upravljanje agregatorima i fleksibilnošću pomoću standardiziranog informacijsko-komunikacijskog podsustava“, svi. 2020, doi: 10.5281/zenodo.4693789.
- [79] R. Faia, T. Pinto, Z. Vale, i J. Corchado, „A Local Electricity Market Model for DSO Flexibility Trading“, *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2019, doi: 10.1109/EEM.2019.8916563.
- [80] H. Khajeh, H. Firoozi, M. R. Hesamzadeh, H. Laaksonen, i M. Shafie-Khah, „A Local Capacity Market Providing Local and System-Wide Flexibility Services“, *IEEE Access*, sv. 9, str. 52336–52351, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069949.
- [81] S. Klyapovskiy, S. You, A. Michiorri, G. Kariniotakis, i H. W. Bindner, „Incorporating flexibility options into distribution grid reinforcement planning: A techno-economic framework approach“, *Applied Energy*, sv. 254, str. 113662, stu. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113662.
- [82] L. Luttenberger Marić, H. Keko, i M. Delimar, „The Role of Local Aggregator in Delivering Energy Savings to Household Consumers“, *Energies*, 15 (2022), 8; 2793, 27, doi: 10.3390/en15082793.
- [83] F. Wahid, M. Fayaz, A. Aljarbouh, M. Mir, M. Aamir, i Imran, „Energy Consumption Optimization and User Comfort Maximization in Smart Buildings Using a Hybrid of the Firefly and Genetic Algorithms“, *Energies*, sv. 13, izd. 17, Art. izd. 17, sij. 2020, doi: 10.3390/en13174363.
- [84] R. Hirmiz, H. M. Teamah, M. F. Lightstone, i J. S. Cotton, „Performance of heat pump integrated phase change material thermal storage for electric load shifting in building demand side management“, *Energy and Buildings*, sv. 190, str. 103–118, svi. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.02.026.

- [85] B. Chen, W. Yao, J. Francis, i M. Bergés, „Learning a Distributed Control Scheme for Demand Flexibility in Thermostatically Controlled Loads“, u *2020 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, stu. 2020, str. 1–7. doi: 10.1109/SmartGridComm47815.2020.9302954.
- [86] O. Kaynakli, „A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 16, izd. 1, str. 415–425, sij. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.08.006.
- [87] „Final consumption – Key World Energy Statistics 2020 – Analysis“, *IEA*. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020/final-consumption> (pristupljeno 19. srpanj 2022.).
- [88] A. Allouhi, Y. El Fouih, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraouli, i Y. Mourad, „Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends“, *Journal of Cleaner Production*, sv. 109, str. 118–130, pros. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.139.
- [89] O. Valentini, N. Andreadou, P. Bertoldi, A. Lucas, I. Saviuc, i E. Kotsakis, „Demand Response Impact Evaluation: A Review of Methods for Estimating the Customer Baseline Load“, *Energies*, sv. 15, izd. 14, Art. izd. 14, sij. 2022, doi: 10.3390/en15145259.
- [90] AEIC Load Research Committee, „Demand Response Measurement & Verification Applications for Load Research“, 2009. [Na internetu]. Dostupno na: [https://www.naesb.org/pdf4/dsmee\\_group2\\_040909w5.pdf](https://www.naesb.org/pdf4/dsmee_group2_040909w5.pdf)
- [91] XENERGY for California Energy Commission Sacramento, California, „Protocol Development for Demand Response Calculation— Draft Findings and Recommendations“, 2002. [Na internetu]. Dostupno na: [http://www.calmac.org/publications/2002-08-02\\_XENERGY\\_REPORT.pdf](http://www.calmac.org/publications/2002-08-02_XENERGY_REPORT.pdf)
- [92] B. Kaneshiro, „Baselines for Retail Demand Response Programs“, 2009. [Na internetu]. Dostupno na: [https://www.caiso.com/Documents/Presentation-Baselines\\_RetailDemandResponsePrograms.pdf](https://www.caiso.com/Documents/Presentation-Baselines_RetailDemandResponsePrograms.pdf)
- [93] D. Rolnick i ostali, „Tackling Climate Change with Machine Learning“. lipanj 2019. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/tackling-climate-change-with-machine-learning/>
- [94] L. Budin, I. Duilo, i M. Delimar, „Day-ahead Multiple Households Load Forecasting using Deep Learning and Unsupervised Clustering“, u *2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, svi. 2022, str. 30–35. doi: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803401.
- [95] M. Borunda, O. A. Jaramillo, A. Reyes, i P. H. Ibarzüengoytia, „Bayesian networks in renewable energy systems: A bibliographical survey“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 62, str. 32–45, ruj. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.030.
- [96] S. Atef i A. B. Eltawil, „Real-Time Load Consumption Prediction and Demand Response Scheme Using Deep Learning in Smart Grids“, u *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, tra. 2019, str. 1043–1048. doi: 10.1109/CoDIT.2019.8820363.

- [97] E. Mocanu i ostali, „On-Line Building Energy Optimization Using Deep Reinforcement Learning“, *IEEE Transactions on Smart Grid*, sv. 10, izd. 4, str. 3698–3708, srp. 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2834219.
- [98] M. Dib, R. Abdallah, i O. Dib, „Optimization Approach for the Aggregation of Flexible Consumers“, *Electronics*, sv. 11, izd. 4, Art. izd. 4, sij. 2022, doi: 10.3390/electronics11040628.
- [99] A. Agnetis, G. Dellino, G. De Pascale, G. Innocenti, M. Pranzo, i A. Vicino, „Optimization models for consumer flexibility aggregation in smart grids: The ADDRESS approach“, u *2011 IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS)*, lis. 2011, str. 96–101. doi: 10.1109/SGMS.2011.6089206.
- [100] Y. Weng i R. Rajagopal, „Probabilistic baseline estimation via Gaussian process“, u *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, srp. 2015, str. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2015.7285756.
- [101] Y. Weng, J. Yu, i R. Rajagopal, „Probabilistic baseline estimation based on load patterns for better residential customer rewards“, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, sv. 100, str. 508–516, ruj. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.02.049.
- [102] N. H. Tehrani, U. T. Khan, i C. Crawford, „Baseline load forecasting using a Bayesian approach“, u *2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, svi. 2016, str. 1–4. doi: 10.1109/CCECE.2016.7726749.
- [103] P. Schwarz, S. Mohajeryami, i V. Cecchi, „Building a Better Baseline for Residential Demand Response Programs: Mitigating the Effects of Customer Heterogeneity and Random Variations“, *Electronics*, sv. 9, izd. 4, Art. izd. 4, tra. 2020, doi: 10.3390/electronics9040570.
- [104] S. Park, S. Ryu, Y. Choi, J. Kim, i H. Kim, „Data-Driven Baseline Estimation of Residential Buildings for Demand Response“, *Energies*, sv. 8, izd. 9, Art. izd. 9, ruj. 2015, doi: 10.3390/en80910239.
- [105] F. Wang, K. Li, C. Liu, Z. Mi, M. Shafie-Khah, i J. P. S. Catalão, „Synchronous Pattern Matching Principle-Based Residential Demand Response Baseline Estimation: Mechanism Analysis and Approach Description“, *IEEE Transactions on Smart Grid*, sv. 9, izd. 6, str. 6972–6985, stu. 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2824842.
- [106] Y. Zhang, W. Chen, R. Xu, i J. Black, „A Cluster-Based Method for Calculating Baselines for Residential Loads“, *IEEE Transactions on Smart Grid*, sv. 7, izd. 5, str. 2368–2377, ruj. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2463755.
- [107] „Očitanje brojila“, *hep.hr*. <https://www.hep.hr/ods/kupci-154/kucanstvo/ocitanje-brojila/30> (pristupljeno 27. srpanj 2022.).
- [108] K. Hrvoje, I. Krajnović, D. Crnarić, i T. Stupić, „Potencijali isorištavanja podataka s pametnih obračunskih brojila“, 2018.
- [109] H. Keko, S. Sučić, L. Luttenberger Marić, P. Hasse, i K. Isakovic, „Widening the Path for Demand-Side Flexibility Services in European Households: Joint findings of the FLEXCoop



- and HOLISDER projects in standardization and interoperability“, 2021. [Na internetu]. Dostupno na: <https://drive.google.com/file/d/1e4aBUfKA9fIYfVTQwUbQTrVV927VOGtS/view>
- [110] H. Keko, K. Tzanidakis, C. Malavazos, P. Hasse, i A. Wolf, „Analysis of EU-wide Interoperability Standards and Data Models and Harmonization Requirements“. FLEXCOOP - Grant Agreement No. 773909, 2017. [Na internetu]. Dostupno na: <http://www.flexcoop.eu/deliverables-and-resources>
- [111] „IEC Approves OpenADR Specification“. [https://www.openadr.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=92:iec-approves-openadr-specification&Itemid=121](https://www.openadr.org/index.php?option=com_content&view=article&id=92:iec-approves-openadr-specification&Itemid=121) (pristupljeno 13. lipanj 2022.).
- [112] „IEC 62746-10-1 - Systems interface between customer energy management system and the power management system - Part 10-1: Open automated demand response | Engineering360“. <https://standards.globalspec.com/std/13102917/IEC%2062746-10-1> (pristupljeno 13. lipanj 2022.).
- [113] „OpenADR Alliance Releases 2.0b Profile Specification“. [https://www.openadr.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=84](https://www.openadr.org/index.php?option=com_content&view=article&id=84) (pristupljeno 13. lipanj 2022.).
- [114] „IEC TR 62939-1:2014 | IEC Webstore“. <https://webstore.iec.ch/publication/7478> (pristupljeno 14. lipanj 2022.).
- [115] G. W. Hart, E. C. K. Jr, i F. C. Schweppe, „Non-intrusive appliance monitor apparatus“, US4858141A, 15. kolovoz 1989. Pristupljeno: 28. srpanj 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <https://patents.google.com/patent/US4858141/en>
- [116] A. M. Harsha S. Abeykoon, A. Paveen Senura Perera, R. K. Sanjeevika Prabodhanie, M. D. N. V. Matharage, i A. P. Abeyasinghe, „A Machine Learning Approach for NILM based on Superimposed Current Profiles“, u *2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCCon)*, srp. 2020, str. 584–589. doi: 10.1109/MERCCon50084.2020.9185203.
- [117] H. Murata i T. Onoda, „Estimation of power consumption for household electric appliances“, u *Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing, 2002. ICONIP '02.*, stu. 2002, sv. 5, str. 2299–2303 sv.5. doi: 10.1109/ICONIP.2002.1201903.
- [118] P. Klein, D. Benyoucef, J. Merckle, i D. O. Abdeslam, „Analysis of fingerprints of electric appliances as starting point for an appliance characteristics catalog“, u *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, lis. 2014, str. 3517–3521. doi: 10.1109/IECON.2014.7049021.
- [119] „Smart Metering deployment in the European Union | JRC Smart Electricity Systems and Interoperability“. <https://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-metering-deployment-european-union> (pristupljeno 01. ožujak 2022.).
- [120] A. Druckman i T. Jackson, „Household energy consumption in the UK: A highly geographically and socio-economically disaggregated model“, *Energy Policy*, sv. 36, izd. 8, str. 3177–3192, kol. 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.03.021.

- [121] U. Awan i I. Knight, „Domestic sector energy demand and prediction models for Punjab Pakistan“, *Journal of Building Engineering*, sv. 32, str. 101790, stu. 2020, doi: 10.1016/j.jobee.2020.101790.
- [122] M. Yalcintas i A. Kaya, „Roles of income, price and household size on residential electricity consumption: Comparison of Hawaii with similar climate zone states“, *Energy Reports*, sv. 3, str. 109–118, stu. 2017, doi: 10.1016/j.egy.2017.07.002.
- [123] D. Wiesmann, I. Lima Azevedo, P. Ferrão, i J. E. Fernández, „Residential electricity consumption in Portugal: Findings from top-down and bottom-up models“, *Energy Policy*, sv. 39, izd. 5, str. 2772–2779, svi. 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2011.02.047.
- [124] P. Wyatt, „A dwelling-level investigation into the physical and socio-economic drivers of domestic energy consumption in England“, *Energy Policy*, sv. 60, str. 540–549, ruj. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.05.037.
- [125] T. F. Sanquist, H. Orr, B. Shui, i A. C. Bittner, „Lifestyle factors in U.S. residential electricity consumption“, *Energy Policy*, sv. 42, str. 354–364, ožu. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.092.
- [126] G. Y. Yun i K. Steemers, „Behavioural, physical and socio-economic factors in household cooling energy consumption“, *Applied Energy*, sv. 88, izd. 6, str. 2191–2200, lip. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.01.010.
- [127] S. Verbeke i A. Audenaert, „Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 82, str. 2300–2318, velj. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.083.
- [128] „Interdisciplinary Strategy for Zero-emissions for the Integrated Sustainable growth of the Island of Krk 2012-2013“, Ponikve Eko Otok Krk, 2012.
- [129] „DHMZ - Croatian Meteorological and Hydrological Service“, *Meteo.hr*. [https://meteo.hr/index\\_en.php](https://meteo.hr/index_en.php) (pristupljeno 01. ožujak 2022.).
- [130] „Weather for Krk, Croatia“, *Time and Date AS*. <https://www.timeanddate.com/weather/@3197208> (pristupljeno 01. ožujak 2022.).
- [131] „Heating & Cooling Degree Days – Worldwide Data Calculation“, *BizEE Software*. <https://www.degreedays.net/#generate> (pristupljeno 01. ožujak 2022.).
- [132] *Pravilnik o energetsom pregledu zgrade i energetsom certificiranju NN 88/2017*. 2017, str. 5. Pristupljeno: 29. srpanj 2022. [Na internetu]. Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017\\_09\\_88\\_2093.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_09_88_2093.html)
- [133] N. Fonseca i ostali, „Bottom-up approach to compute der flexibility in the transmission-distribution networks boundary“, u *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2018)*, stu. 2018, str. 1–7. doi: 10.1049/cp.2018.1866.
- [134] V. Soldo, S. Novak, I. Horvat, i D. Dović, „Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790“, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021. [Na internetu]. Dostupno na:

- [https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Algoritam\\_HRN\\_EN\\_13790\\_%202021.pdf](https://mpgi.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Algoritam_HRN_EN_13790_%202021.pdf)
- [135] D. A. Chwieduk, „Active solar space heating“, 2016, str. 151–202. doi: 10.1016/B978-0-08-100301-5.00008-4.
- [136] T. Kurevija, Kapuralić, Josipa, i M. Macenić, „Comparing seasonal performance factor of different heat pump systems for residential HVAC in the Dfb climate area of Croatia“, predstavljeno na ECOS 2016, Portorož, 2016.
- [137] „Research Data“. [https://www.ari.vt.edu/content/ari\\_vt\\_edu/en/research-data.html](https://www.ari.vt.edu/content/ari_vt_edu/en/research-data.html) (pristupljeno 31. srpanj 2022.).
- [138] C. Reinisch, M. J. Kofler, i W. Kastner, „ThinkHome: A smart home as digital ecosystem“, u *4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*, tra. 2010, str. 256–261. doi: 10.1109/DEST.2010.5610636.
- [139] T. Linnenberg, A. W. Mueller, L. Christiansen, C. Seitz, i A. Fay, „OntoENERGY - A Lightweight Ontology for Supporting Energy-efficiency Tasks - Enabling Generic Evaluation of Energy Efficiency in the Engineering Phase of Automated Manufacturing Plants“, 2013. doi: 10.5220/0004622903370344.
- [140] T. G. Stavropoulos, D. Vrakas, D. Vlachava, i N. Bassiliades, „BOnSAI: a smart building ontology for ambient intelligence“, u *Proceedings of the 2nd International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics*, New York, NY, USA, lip. 2012, str. 1–12. doi: 10.1145/2254129.2254166.
- [141] „Energy@home - Home“. <http://www.energy-home.it/SitePages/Home.aspx> (pristupljeno 31. srpanj 2022.).
- [142] „Urban Energy Ontology | Semanco tools“. <http://www.semanco-tools.eu/urban-energy-ontology> (pristupljeno 31. srpanj 2022.).
- [143] „EEBUS | Make the world speak energy - EEBus Initiative e.V.“ <https://www.eebus.org/> (pristupljeno 31. srpanj 2022.).
- [144] „SAREF: the Smart Applications REFERENCE ontology“. <https://saref.etsi.org/core/v3.1.1/> (pristupljeno 17. svibanj 2022.).
- [145] „IEC 61970-301:2020 | IEC Webstore“. <https://webstore.iec.ch/publication/62698> (pristupljeno 17. svibanj 2022.).
- [146] „Introduction — Brick Ontology Documentation“. <https://docs.brickschema.org/intro.html> (pristupljeno 17. svibanj 2022.).
- [147] X. Zhou, N. Yu, W. Yao, i R. Johnson, „Forecast load impact from demand response resources“, u *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, srp. 2016, str. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741992.





## **BIOGRAFIJA**

Leila Luttenberger Marić rođena je 1990. godine u Rijeci, gdje je završila osnovnu školu i gimnaziju na talijanskom jeziku. 2009. godine upisuje studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci koji završava 2014. godine stjecanjem titule magistre inženjerke elektrotehnike. Nakon završetka studija, zapošljava se kao pripravnik u Gradu Rijeci gdje obavlja poslove razvoja novih projekata i održavanja postojećih sustava javne rasvjete. Od 2016. do 2019. godine radi kao istraživač na Energetskom institutu Hrvoje Požar u Odjelu za obnovljive izvore energije i energetske učinkovitost. U tom periodu radi na mnogobrojnim međunarodnim projektima koji se bave energetsom učinkovitošću zgrada i načinima financiranja takvih projekata energetske učinkovitosti, ublažavanjem i adaptacijom na klimatske promjene, održivim regionalnim planiranjem i sl. Autorica je mnogobrojnih studija iz područja obnovljivih izvora energije, zaštite okoliša i energetske učinkovitosti. Od 2019. godine radi na radnom mjestu voditelja projekata u Končar – Inženjeringu za energetiku i transport, a kasnije Končar Digitalu, gdje radi na međunarodnim projektima istraživanja i razvoja u područjima digitalizacije u energetsom sektoru, naprednih mreža i aktivacije krajnjih korisnika u elektroenergetskom sustavu (EES). Autorica je i koautorica znanstvenih i stručnih radova iz područja naprednih mreža, energetske učinkovitosti i zaštite okoliša.

# OBJAVLJENI RADOVI IZ PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

## Izvorni znanstveni radovi u CC časopisima:

- L. Luttenberger Marić, H. Keko, and M. Delimar, “The Role of Local Aggregator in Delivering Energy Savings to Household Consumers,” *Energies*, 15 (2022), 8; 2793, 27, doi: 10.3390/en15082793.

## Znanstveni radovi s međunarodnom recenzijom:

- L. Luttenberger Marić, H. Keko, and S. Sučić, “Semantic alignment in monitoring and verification of energy savings achieved by demand response flexibility programs,” *45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, IEEE pp. 55–59, 2022, doi: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803329.
- L. Luttenberger Marić, H. Keko, N. Banović, B. Donata and S. Sučić, “A holistic functional analysis of a flexibility aggregator in a dynamic market environment“ 2022 18th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEM54602.2022.9921158.

## Znanstveni i stručni radovi s domaćom recenzijom:

- H. Keko, L. Luttenberger, L. Babić, and S. Sučić, “Semantika podataka u arhitekturi za pohranu i upravljanje fleksibilnom potrošnjom kod krajnjih korisnika,” *14. simpozij o vođenju EES HRO CIGRÉ*, studeni 2020, <https://www.bib.irb.hr/1145003>
- H. Keko, L. Babić, S. Sučić, and L. Luttenberger, “Upravljanje agregatorima i fleksibilnošću pomoću standardiziranog informacijsko-komunikacijskog podsustava,” *7. (13.) savjetovanje HO CIRED*, Šibenik 2021., <https://www.bib.irb.hr/114500>
- L. Luttenberger Marić; V. Bukarica, „Combined effort opportunities of aggregated demand response flexibility and energy savings in households”, *Journal of Energy*, vol. 70 Number 4 (2021), pp. 7–12, <https://doi.org/10.37798/2021704257>

## **BIOGRAPHY**

Leila Luttenberger Marić was born in Rijeka in 1990, where she completed her primary and secondary education in Italian language. In 2009, she enrolled in electrical engineering studies at the Technical Faculty of the University of Rijeka, where she has graduated in 2014 with a master's degree in electrical engineering. After completing her studies, she was employed as an intern in the City of Rijeka, where she was involved in developing new projects and maintaining existing public lighting systems. From 2016 to 2019, she worked as a researcher at the Energy Institute Hrvoje Požar in the Department for Renewable Energy Sources and Energy Efficiency. During that period, she worked on numerous international projects dealing with the energy efficiency of buildings and energy efficiency financing mechanisms, mitigation and adaptation to climate change, sustainable regional planning, etc. She is the author of numerous studies in the field of renewable energy sources, environmental protection, and energy efficiency. Since 2019, she has been working as a project manager in Končar - Power Plant and Electric Traction Engineering Inc., and later Končar – Digital Ltd, where she is working on numerous international research and development projects in the areas of digitalisation in the energy sector, smart grids, and activation of consumers in the energy market. She is the author and co-author of scientific and professional papers in the field of smart grids, energy efficiency and environmental protection.