

# Modeliranje i simulacija energetske tranzicije u sektoru domaćinstava

Boban S. Pavlović



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

**[ДР РГФ]**

Modeliranje i simulacija energetske tranzicije u sektoru domaćinstava | Boban S. Pavlović | | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007442>

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO–GEOLOŠKI FAKULTET

Boban S. Pavlović

**MODELIRANJE I SIMULACIJA ENERGETSKE  
TRANZICIJE U SEKTORU DOMAĆINSTVA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Boban S. Pavlović

**MODELING AND SIMULATION OF ENERGY  
TRANSITION IN THE HOUSEHOLD SECTOR**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

## KOMISIJA ZA ODBRANU DOKTORSKE DISERTACIJE

### Mentor:

---

dr Dejan Ivezić, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – geološki fakultet  
Izborna naučna oblast: Elementi mašinskih i energetske sistema

### Članovi komisije:

---

dr Marija Živković, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – geološki fakultet  
Izborna naučna oblast: Elementi mašinskih i energetske sistema

---

dr Miloš Tanasijević, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – geološki fakultet  
Izborna naučna oblast: Elementi mašinskih i energetske sistema

---

dr Aleksandar Madžarević, docent  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – geološki fakultet  
Izborna naučna oblast: Elementi mašinskih i energetske sistema

---

dr Miloš Banjac, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet  
Izborna naučna oblast: Termomehanika

---

dr Dušan Gordić, redovni profesor  
Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka  
Izborna naučna oblast: Energetika i procesna tehnika

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

## IZJAVA ZAHVALNOSTI

*Ova doktorska disertacija je nastala u okviru Poziva Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja za uključivanje mladih istraživača u naučnoistraživački rad u Naučno-istraživačkim organizacijama iz 2018. godine. Disertacija je rezultat mog višegodišnjeg rada u okviru doktorskih studija i velike podrške ljudi iz mog okruženja koji su mi nemerljivo i bezrezervno pomogli.*

*Na prvom mestu veliku zahvalnost dugujem prof. dr Dejanu Iveziću na mentorstvu, stručnoj pomoći, podršci i korisnim savetima prilikom istraživanja i pisanja disertacije. Hvala mu što je za svaku moju nedoumicu imao rešenje i što je nesebično prenosio svoje znanje i iskustvo. Posebno hvala profesoru na prilici da budem deo Katedre za opšte mašinstvo i termodinamiku i da tu radim doktorsku disertaciju. Osim profesionalnog izazova, posao istraživača predstavljao je posebno zadovoljstvo u okruženju dobrih kolega i dobrih ljudi. Nadam se da je pred svima nama još mnogo godina saradnje i prijateljstva.*

*Iskrenu i posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Mariji Živković, koja je od samog početka mojih doktorskih studija učestvovala u mom naučnom razvoju. Sve njene sugestije i saveti bili su mi veoma vredni i poučni. Hvala za posvećeno vreme, inovativne ideje, otvorenu saradnju i preneseno znanje tokom celog puta na doktorskim studijama.*

*Zahvaljujem se i ostalim članovima komisije: prof. dr Milošu Tanasijeviću, prof. dr Milošu Banjcu i prof. dr Dušanu Gordiću na velikoj časti koju si mi ukazali prihvatanjem članstva u komisiji.*

*Za kraj, ali ne najmanje važno, zahvalnost dugujem porodici i prijateljima na razumevanju i podršci koju su mi pružili tokom celih studija. Neizmerno hvala mojoj supruzi Dunji i majci Vesni što su verovala u mene. Svaki moj uspeh jeste i njihova zasluga. Nadam se da sam vas učinio ponosnim.*

# MODELIRANJE I SIMULACIJA ENERGETSKE TRANZICIJE U SEKTORU DOMAĆINSTVA

## SAŽETAK

Aktuelnu energetska tranziciju odlikuje ubrzanje procesa dekarbonizacije energetskih sistema, unapređenje energetske efikasnosti, razvoj čistijih tehnologija baziranih na obnovljivim izvorima energije i održivije korišćenje prirodnih resursa. Da bi se napravio ovako krupan zaokret u postojećim energetskim sistemima, osim promene postojećih tehnologija, potrebno je u planiranje energetske tranzicije uključiti i političke, sociološke, ekonomske i ekološke aspekte, a pre svega obrasce ponašanja i donošenja odluka krajnjih potrošača.

Predmet istraživanja u disertaciji je energetska tranzicija sektora domaćinstva, preciznije tranzicija u grejanju domaćinstava, imajući u vidu da se najviše energije u domaćinstvu troši za zadovoljenje potreba za grejanjem stambenog prostora. Pored toga, evidentno je da je grejanja u domaćinstvu izraženo stohastično, heterogeno i decentralizovano, u smislu da odluke o tranziciji zavise isključivo od svakog pojedinačnog domaćinstva. Sektor domaćinstva je značajan i izazovan za planiranje i zbog činjenice da pruža mogućnost za značajne uštede na nivou nacionalnih energetskih sistema. Zamena individualnih sistema grejanja u međunarodnoj praksi se apostrofira kao proces koji može značajno doprineti smanjenju upotrebe fosilnih goriva, efikasnijem raspolaganju energijom i smanjenju uticaja na klimatske promene i zagađenje životne sredine.

Osnovni cilj ovog istraživanja bio je da se razvije metodološki pristup za podršku energetskom planiranju procesa tranzicije u grejanju domaćinstava, koji bi odgovorio na brojne specifičnosti energetske tranzicije u ovom sektoru. Da bi se ocenili mogući tokovi energetske tranzicije u grejanju domaćinstava i ocenili politički instrumenti za ubrzanje energetske tranzicije, razvijen je simulacioni model zasnovan na agentima (*engl.* Agent Based Model - ABM). Simulacioni model je primenjen na slučaju energetske tranzicije u sektoru domaćinstva u Srbiji. Prethodno su kroz istraživanje prikupljeni podaci o grejanju domaćinstava potrebni za kreiranje ulaznih baza podataka za simulacioni model. Rezultati koji se dobijaju primenom simulacionog modela prikazuju promenu strukture sistema grejanja u domaćinstvima do 2050. godine, u zavisnosti od izabranih instrumenata za podršku tom procesu. Konkretno, simulacije u ABM modelu za slučaj Srbije su pokazale uticaj različitih analiziranih političkih instrumenata na ubrzanje energetske tranzicije, odnosno povećanje zastupljenosti efikasnijih sistema grejanja, manjeg zagađenja vazduha i dr. Osim za ispitivanje efekata određenih političkih instrumenata, kroz model su ispitani i različiti scenariji procesa energetske tranzicije, u cilju analize osetljivosti rezultata na percipirane promene u okruženju.

Povezivanjem istraživanja o grejanju domaćinstava, razvijenog ABM simulacionog modela i klasičnih alata za energetska modeliranje, zaokružen je koncept predloženog pristupa za podršku energetskom planiranju. Ovom integracijom su obezbeđeni uslovi za analizu efekata tranzicije na nivou ukupnog energetskog sistema države, regiona ili lokalne zajednice. Predloženi pristup omogućava ranu procenu efekata neograničenog broja mera podrške i mehanizama za ubrzanje energetske tranzicije u sektoru domaćinstva.

**Ključne reči:** energetika, energetska tranzicija, energetsko planiranje, energetsko modeliranje, obnovljivi izvori energije, domaćinstva, ponašanje potrošača.

**Naučna oblast:** Rudarsko inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Elementi mašinskih i energetskih sistema

**UDK broj:** 536.7:644.1:628.4.02(043.3)

# MODELING AND SIMULATION OF ENERGY TRANSITION IN THE HOUSEHOLD SECTOR

## ABSTRACT

The current energy transition is characterized by the accelerating of the process of decarbonization of energy systems, improvement of energy efficiency, development of cleaner technologies based on renewable energy sources, and more sustainable use of natural resources. To make such a major turn in existing energy systems, in addition to changing existing technologies, it is necessary to include political, sociological, economic, and ecological aspects in planning the energy transition, and above all, the patterns of behavior and decision-making of end consumers.

The objective of research in the dissertation is the energy transition of the household sector, more precisely the transition in household heating, since the main use of energy by households is for heating their homes. In addition, it is evident that heating, as a type of end-use energy in households, is strongly stochastic, heterogeneous, and decentralized, in the sense that decisions on transition depend exclusively on each household. In addition, the household sector is challenging for energy planning because it provides the opportunity for significant savings at the level of national energy systems. The replacement of individual heating systems in international practice is addressed as a process that can significantly contribute to reducing the use of fossil fuels, more efficient use of energy, and reducing the impact on climate change and environmental pollution.

The aim of this research was to develop a methodological approach to support the energy planning of the transition process in household heating, which would respond to the numerous specifics of the energy transition in this sector. To evaluate the possible pathways of energy transition in household heating and to evaluate political instruments for accelerating the energy transition, an agent-based simulation model was developed. The simulation model was applied to the case of energy transition in the household sector in Serbia. In order to create input databases for the simulation model, the survey on household heating was obtained. The results of the simulation model show the changes in structure of the heating systems in households until 2050, depending on the chosen instruments to support that process. In the case of the Serbian household sector, the simulations in the ABM model showed the influence of the different political instruments on accelerating the energy transition, i.e., to a greater share of more efficient heating systems and less air pollution from heating. In addition to examining the effects of the political instruments, various scenarios of the energy transition process were also examined through the model, in order to analyze the sensitivity of the results to perceived changes in the environment.

By integrating a household heating survey, developed ABM simulation model, and classical tools for energy modeling, the concept of the proposed approach to support energy planning is achieved. This integration provides the conditions for the analysis of the transition at the level of the entire energy system. The proposed approach enables an early assessment of the effects of an unlimited number of support measures and mechanisms for accelerating the energy transition in the household sector.

**Keywords:** energy, energy transition, energy planning, energy modeling, renewable energy sources, households, consumer behaviour.

**Scientific field:** Mining engineering

**Scientific subfield:** Elements of mechanical and energy systems

**UDC:** 536.7:644.1:628.4.02(043.3)

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Predmet istraživanja, cilj i hipoteze .....	3
1.2. Naučne metode istraživanja.....	4
1.3. Doprinosi disertacije.....	5
1.4. Sadržaj disertacije.....	6
2. ENERGETSKA TRANZICIJA .....	7
2.1. Energetska tranzicija u Evropskoj uniji.....	8
2.2. Energetska tranzicija u Srbiji .....	13
3. ENERGETSKO PLANIRANJE I MODELIRANJE.....	18
3.1. Planiranje energetske tranzicije.....	19
3.2. Modeliranje za podršku energetsom planiranju .....	20
3.2.1. Modeliranje pristupom „odozgo na dole“ .....	24
3.2.2. Modeliranje pristupom „odozdo na gore“ .....	24
3.3. Karakteristični pristupi u modeliranju energetske tranzicije.....	25
4. MODELIRANJE ZASNOVANO NA AGENTIMA.....	28
4.1. Tipovi simulacija.....	30
4.2. Pojam agenta i osnovne karakteristike .....	31
4.3. Osnovni principi modeliranja zasnovanog na agentima.....	32
4.4. Programski jezici i alati za razvoj modela zasnovanih na agentima .....	32
4.5. Primena modeliranja zasnovanog na agentima u energetskej tranziciji.....	34
5. ISTRAŽIVANJE O GREJANJU U DOMAĆINSTVIMA U REPUBLICI SRBIJI .....	38
5.1. Upitnik za sprovođenje istraživanja .....	40
5.2. Proces anketiranja.....	42
5.3. Tip i veličina uzorka.....	43
5.4. Rezultati istraživanja .....	44
5.4.1. Osnovne karakteristike domaćinstava.....	44
5.4.2. Osnovne karakteristike sistema za grejanje u domaćinstvima.....	46
5.4.3. Stavovi domaćinstava .....	51
5.4.4. Analiza rezultata istraživanja .....	55
6. MODEL ENERGETSKE TRANZICIJE U GREJANJU DOMAĆINSTAVA ZASNOVAN NA AGENTIMA (ABM).....	59
6.1. ABM simulacioni model .....	59



6.2.	Proces donošenja odluke .....	64
6.3.	Instrumenti energetske politike i scenariji energetske tranzicije.....	68
6.4.	Kodiranje ulaznih parametara za domaćinstvo .....	69
6.5.	Rezultati ABM simulacionog modela .....	71
6.5.1.	Struktura sistema grejanja do 2050. godine .....	71
6.5.2.	Projekcije emisije CO <sub>2</sub> .....	74
6.5.3.	Projekcije lokalnog zagađenja .....	75
6.6.	Analiza rezultata ABM simulacionog modela .....	77
7.	INTEGRACIJA ABM SIMULACIONOG MODELA U PROCES ENERGETSKOG PLANIRANJA .....	79
7.1.	Metodološki okvir .....	81
7.2.	Energetsko modeliranje u LEAP-u.....	82
7.3.	Studija slučaja – individualno grejanje u domaćinstvima u Srbiji .....	83
7.4.	Projekcije finalne potrošnje energije .....	84
7.5.	Analiza primene integrativnog pristupa .....	90
8.	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA .....	91
9.	LITERATURA.....	95
10.	SPISAK SLIKA I TABELA .....	I
11.	SPISAK PRILOGA.....	IV

## 1. UVOD

Proces energetske tranzicije u XXI veku karakteriše težnja da se smanji korišćenje fosilnih goriva, kroz povećanje energetske efikasnosti i kroz veću i raznovrsniju primenu obnovljivih izvora energije (OIE) i niskougljeničnih tehnologija (*engl.* low-carbon technologies). Ceo proces je u protekloj deceniji znatno aktuelizovan na globalnom planu (UN, 2012), (UN, 2015), (EC, 2019a), a s obzirom da sam po sebi predstavlja krupan zaokret u dominantnom i tradicionalnom načinu korišćenja energenata, rezultiraće, bar u ranoj fazi, otvaranjem različitih pitanja koja su u korelaciji sa sigurnošću snabdevanja, pravednom tranzicijom, ekonomskim rastom i održivim razvojem (Felder i dr., 2011).

Kao i raniji tranzicioni procesi, sadašnja energetska tranzicija (EC, 2019a) se često prikazuje kao spontani proces (Gielen i dr., 2019), inspirisan inovacijama u tehnologijama za korišćenje obnovljivih izvora i konkurentskom prirodom komercijalnog okruženja i slobodnog tržišta (Rubino i dr., 2021). Međutim, energetska tranzicija globalnog ljudskog društva ili nekog pojedinačnog nacionalnog energetskeg sistema nije samo vezana za promene primenjenih tehnologija. To je danas složeniji proces koji uključuje ekonomske, socijalne, političke, ekološke i druge aspekte implementacije čistije, „zelenije“ energije u postojeće energetske sektore (Olave i Vargasa-Payera, 2020).

Energetska tranzicija je proces koji zbog svoje prirode karakterišu velike neizvesnosti i nejasnoće, pa je iz tog razlog veliki izazov napraviti projekcije energetskeg razvoja za narednih 20-30 godina (Valkenburg i Gracceva, 2016). Da bi se na taj izazov odgovorilo, najčešće se uz pomoć različitih metodoloških pristupa vrši energetske planiranje budućeg razvoja. Na ovaj način se rizik od budućih neizvesnosti može u određenoj meri minimizirati (Hobbs i Meier, 2000), a takođe se može predvideti i odgovor za uočene izazove i pretnje po proces energetske tranzicije (Sokołowski i Heffron, 2022).

Složenost trenutne tranzicije, zajedno sa rastom globalnih energetskeg potreba, čini da se energetske planiranje sve više smatra holističkim procesom (Johannsen i dr., 2021) sa fokusom na multidisciplinarnoj proceni i planiranju društvene, ekonomske, tehnološke, ekološke i političke izvodljivosti energetske tranzicije energetskeg sistema (McGookin i dr., 2021). Pored multidisciplinarnog karaktera planiranja, ističe se i potrebe da se izgradi konsenzus o najboljem putu napred. Da bi se definisao dugoročni plan dekarbonizacije i da bi se obezbedila njegova primena, plan „mora biti dovoljno shvaćen i prihvaćen od strane većine zainteresovanih strana, kako onih koji su odgovorni za implementaciju, tako i onih na koje se transformacija odnosi“ (Waisman i dr., 2019).

Za realističnije planiranje, kome se uvek teži, potrebni su reprezentativni ulazni podaci od kojih će ceo proces planiranja i započeti. Problem postaje daleko složeniji kada je u pitanju energetske planiranje u decentralizovanim energetskeg sektorima, kao što je potražnja za energijom u sektoru domaćinstva.

Pored svoje složenosti, heterogenosti i izražene stohastičnosti, koje same po sebi predstavljaju izazov kod dugoročnog planiranje energetske tranzicije, sektor domaćinstva je posebno bitan i zbog činjenice da pruža mogućnosti za značajno unapređenje energetske efikasnosti i ostvarivanje energetskeg ušteda (Naef i dr., 2019). Primera radi, u ukupnoj finalnoj potrošnji energije u Evropskoj uniji (EU), sektor domaćinstva zauzima nešto više od 1/4 (oko 26% udela), a najveći deo potrošene energije (oko 63,6%) odlazi na grejanje stambenog prostora (Eurostat, 2020). Iz navedenih razloga, energetska tranzicija u grejanju domaćinstava, kroz zamenu postojećih sistema grejanja za efikasnije sisteme ili unapređenje energetske efikasnosti stambenih objekata kroz termoizolaciju, apostrofira se kao proces koji može značajno doprineti efikasnijem korišćenju energije, smanjenju upotrebe fosilnih goriva i smanjenju negativnih dejstava sektora na klimatske promene i zagađenje vazduha (Foggia, 2018), (Tian i dr., 2021).

S druge strane, troškovi grejanja su jedan od većih godišnjih troškova za domaćinstva. Čak u devet članica EU preko 20% domaćinstava u donjem kvintilu prihoda ima problem da priušti grejanje stambenog prostora (OECD, 2019). Ovi podaci indirektno ukazuju da, ukoliko se tranzicija u grejanju prepusti samo domaćinstvima, bez politike koja bi stimulisala ubrzanje tranzicije, postupak zamene

zastarelih i neefikasnih sistema grejanja za moderne i efikasnije tehnologije neće biti moguć za značajan broj domaćinstava.

Individualno grejanje je, sa aspekta energetske tranzicije ka efikasnijim tehnologijama i većoj primeni OIE, potpuno zavisno od odluka domaćinstava na individualnom nivou. Za razliku od tranzicije u daljinskom grejanju ili elektroprivredi, koje se dugoročno planiraju i jednostavnije anticipiraju kroz energetske planove, za utvrđivanje dinamike i obima tranzicije individualnih sistema grejanja ne postoji čvrst oslonac u teoriji i praksi, jer je sam proces uslovljen lokalnim specifičnostima konkretnog sistema i mnoštvom pojedinačnih odluka. Ova činjenica čini tranziciju u sektoru domaćinstva veoma fragmentiranom i uslovljenom preprekama na nivou potrošača, čiji uticaj nije lako kvantifikovati.

Važeća Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine (RS, 2015) prepoznaje značaj aktuelne energetske tranzicije za koju treba stvoriti institucionalni, finansijski i tehnički okvir kako bi se povećala energetska efikasnost i udeo OIE. Neophodnost energetske tranzicije u ovom pravcu ogleda se i u obavezi smanjenje emisije gasova staklene bašte za 9,8% do 2030. godine koju je Srbija preuzela prema Pariskom klimatskom sporazumu (UNDP, 2019).

Ukupna finalna potrošnja energije u energetske svrhe u Republici Srbiji u 2020. godini iznosila je oko 8,66 Mten (miliona tona ekvivalentne nafte). Najveći udeo u toj potrošnji ima sektor domaćinstva gde je utrošeno oko 3,49 Mten, što je oko 40% od ukupne finalne potrošnje (Eurostat, 2022a), a u prethodnim godinama taj udeo je najčešće bio veći od 1/3 potrošene energije. U sektoru domaćinstva u Srbiji najviše energije se troši za grejanje stambenog prostora – oko 66% (Eurostat, 2022b). Najveći broj domaćinstva, njih oko 3/4 se greje pomoću individualnih sistema grejanja (TOPS, 2021). Ovi podaci ukazuju na zaključak da individualno grejanje predstavlja jedno od ključnih mesta energetske tranzicije u Republici Srbiji.

Detalji o strukturi sistema grejanja i potrošnji u domaćinstvima na nacionalnom nivou delom su dostupni iz zvaničnih statistika, energetskog bilansa i anketa o potrošnji. Ovi dokumenti su značajan izvor kod analize energetske tranzicije sektora domaćinstva, ali zbog heterogenosti domaćinstava, različitih motiva, navika, stavova potrošača, lokacijskih uslova i sl., teško je isključivo na osnovu dostupnih podataka napraviti projekciju načina grejanja za narednih 20-30 godina. Kako je životni vek sistema grejanja oko 20 godina, ne može se očekivati da će se energetska tranzicija u grejanju domaćinstava desiti naglo (Gargiulo i Gallachóir, 2013), ali isto tako, i zbog promena na tržištu, promene legislative, promene stavova potrošača i drugih činilaca, nije svrsishodno planirati da će tranzicija ka efikasnijem grejanju biti po ujednačenoj stopi ili imati jednoobrazan karakter.

Iz navedenog se može uočiti da energetske planiranje i modeliranje u sektoru domaćinstva, osim pitanja dostupnosti podataka, otvara i pitanje koji je metodološki pristup najpogodniji (Johannsen i dr., 2021). Uzimajući u obzir navedenu kompleksnost energetskog sektora domaćinstva i donekle nepredvidljivu prirodu individualnog donošenja odluka na nivou svakog domaćinstva, pristupi koji su fokusirani na modeliranje i simulacije „odozdo na gore“ (*engl.* bottom-up), odnosno od nivoa krajnjeg potrošača do energetskog sektora ili energetskog sistema u celini, postali su veoma aktuelni. Svoju primenu nalaze kao podrška u energetskom planiranju i donošenju odluka na lokalnom, nacionalnom i regionalnom nivou. Ovi modeli, pre svega, teže da otklone postojeće ograničenosti pristupa „odogzo na dole“ (*engl.* top-down), koji su se u slučaju modeliranja i simulacija energetske tranzicije u sektorima sa velikim brojem aktera pokazali kao neadekvatni (Hansen i dr., 2019). Ovi modeli zapostavljaju kompleksnost društvene dinamike interakcija potrošača, kao i činioce koji na mikro nivou utiču na odluke o načinu grejanja.

Kao jedan od relativno novijih pristupa „odozdo na gore“ u energetskom modeliranju javlja se tzv. modeliranje zasnovano na agentima (*engl.* agent based modeling – ABM). ABM, između ostalog, karakteriše mogućnost razvoja složenih entiteta (agenata) i modeliranja interakcija između agenata međusobno i agenata sa spoljnim okruženjem u energetskom sistemu. Stvaranje uslova za ispitivanje

ovih činilaca jeste samo po sebi jedna nova vrednost koja može unaprediti metodološki pristup, ali i rezultate modeliranja i simulacija energetske tranzicije u domaćinstvima.

Ono što je univerzalna odlika modela za podršku energetskom planiranju, odnosi se i na „bottom-up“ modele zasnovane na agentima, a to je težnja da se analizira osetljivost polaznih parametara u modelu na moguće uticaje spolja. S tim u vezi, praksa je da se kroz modeliranje i simulaciju energetske tranzicije testira više scenarija energetske tranzicije (Tian i dr., 2021). Izlazni podaci iz scenarija se zatim mogu porediti u cilju utvrđivanja uzročno-posledičnih veza između eventualnih prepreka ili pokretača, kao i radi smanjenja stepena neizvesnosti koje svako planiranje ima. Da bi se obezbedila što približnija slika realnog sistema koji je predmet istraživanja, ove pristupe odlikuje rukovanje sa velikim bazama podataka, koje se koriste za modelovanje entiteta koji su predmet istraživanja. U svrhu obezbeđenja baza podataka, koriste se postojeći statistički podaci, ali se sprovode i *ad hoc* istraživanja u cilju prikupljanja nedostajućih podataka na reprezentativnom uzorku za ciljanu populaciju.

### 1.1. Predmet istraživanja, cilj i hipoteze

Energetska tranzicija u grejanju domaćinstava u Srbiji jeste predmet istraživanja ove doktorske disertacije. Grejanje u domaćinstvima je najdominantniji vid potrošnje energije i posledično najveći uzročnik lokalnog zagađenja i emisije gasova staklene bašte u ovom sektoru. Osim toga, kod grejanja je najviše izražena heterogenost, dok je zadovoljenje ostalih energetskih potreba u domaćinstvu prvenstveno vezano za potrošnju električne energije čija proizvodnja je uglavnom centralizovana i planirana od strane države i elektroprivrednih organizacija. Heterogenost u grejanju domaćinstava se ogleda u korišćenju različitih energenata, različitoj konfiguraciji sistema grejanja, različitoj efikasnosti primenjenih tehnologija, razlikama u potrošnji koje su, između ostalog, uslovljene i nivoom termoizolacije objekata, navikama potrošača i dr. Iz navedenih razloga, težište u radu je upravo na istraživanju fenomena energetske tranzicije u grejanju domaćinstava.

Pod samim terminom energetske tranzicije u grejanju domaćinstava podrazumeva se transformacija pojedinačnih energetskih sistema, dominantno oslonjenih na zastarelim tehnologijama baziranim na upotrebi drvne biomase i uglja, u energetske sisteme dominantno bazirane na OIE, sa većim stepenom energetske efikasnosti i uštedom energije.

Kako je grejanje aktivnost koja obuhvata najveću potrošnju energije u ovom energetskom sektoru, i kako najveći broj domaćinstava koristi individualne sisteme grejanje, osnovni cilj ovog istraživanja jeste da se prikupe nedostajuće informacije o individualnom grejanju domaćinstava u Srbiji, karakteristikama domaćinstava, njihovom ponašanju, stavovima i spremnosti da transformišu način grejanja i da se osnovu toga kreiraju ABM simulacioni „bottom-up“ modeli, koji bi predstavljali podršku u upravljanju energetskom tranzicijom i u definisanju energetske politike. Povezivanjem oblasti ABM-a i energetske tranzicije u domaćinstvima, otvara se mogućnost za kvalitetnije sagledavanje glavnih uticajnih činilaca na ponašanje domaćinstava i bolje razumevanje procesa njihovog donošenja odluka.

Načelno su poznati osnovni izazovi i prepreke za održivije grejanje domaćinstava u Srbiji: neefikasno korišćenje električne energije za grejanje prostora, sagorevanje ogrevnog drveta u zastarelim pećima sa niskom energetskom efikasnošću, nedostatak investicionog ulaganja u unapređenje energetske efikasnosti objekata, problem nedostatka podsticajnih mera za unapređenje individualnih sistema grejanja, problem nedovoljne informisanosti finalnih korisnika o naprednim načinima grejanja itd. (HERON, 2015), (RZS, 2021a). Međutim, ovom energetskom sektoru nedostaje temeljna analiza koja bi pre svega procenila efekte prepreka, odnosno kvantifikovala njihov uticaj na energetsku tranziciju. Dalje, potrebno je ispitati efikasnost konkretnih političkih instrumenata na smanjenje prepreka ili njihovo potpuno neutralisanje. Modeliranje i simulacije se upravo primenjuju u ovakve svrhe. Posebno je značajno što se kroz njih pruža mogućnost testiranja osetljivosti prepreka i političkih instrumenata kroz alternativne scenarije.

Da bi ABM model bio utemeljen na stvarnom stanju, empirijski podaci o domaćinstvima, kao osnovnoj jedinici ovog energetskeg sektora, dobijeni su pomoću istraživanja o načinu grejanja domaćinstava, potrošnji, navikama, stavovima i spremnosti domaćinstava da investiraju u efikasnije i ekološki prihvatljivije sisteme grejanja. Istraživanjem je obuhvaćena teritorija Republike Srbije, a veličina uzorka je 1.100 domaćinstava sa individualnim grejanjem. Podaci o makro okruženju u kome se tranzicija odvija, prikupljeni su analizom relevantnih domaćih i međunarodnih studija, analizom tržišta energenata i dostupnih tehnologija, kao i primera dobre prakse iz naučne i stručne literature u primeni instrumenata energetske politike za podršku energetskeg tranziciji ka održivijem grejanju. Dobijeni i prikupljeni podaci u toku istraživanja iskorišćeni su kao ulaz u ABM model za simulaciju energetske tranzicije sa ciljem ocene različitih scenarija u sektoru domaćinstava u Srbiji do 2050. godine. Rezultati iz simulacionog ABM modela integrisani su u celovit metodološki pristup za podršku energetskeg planiranju.

Osnovna hipoteza od koje se pošlo u istraživanju jeste da se ponašanje domaćinstava, njihove socijalne interakcije i donošenje odluka o načinu grejanja može modelirati i simulirati na prihvatljivom nivou apstrakcije. Rezultati predloženog pristupa treba da obezbede nova znanja o potencijalu za energetskeg tranziciju ka održivijem grejanju i projekcije strukture sistema grejanja i finalne potrošnje energije.

Ostale hipoteze koje proističu iz osnovne hipoteze, a na kojima se takođe zasniva istraživački rad na disertaciji su:

- Kontinuirana energetska tranzicija ka efikasnijem korišćenju energije u sektoru domaćinstva uslovljena je aktivnom energetskeg politikom, čije sprovođenje zahteva primenu novih alata za modeliranje i simulaciju, kao podršku planiranju i odlučivanju.
- Na osnovu istraživanja na reprezentativnom uzorku o strukturi individualnih sistema grejanja, energetskeg efikasnosti objekata u Srbiji, stavovima domaćinstava i ponašanju vezanom za grejanje, moguće je obezbediti ulazne podatke za simulaciju energetskeg tranzicije u budućem periodu.
- Modeliranjem i simulacijom energetskeg tranzicije moguće je analizirati efekte različitih aktivnosti i ponašanja potrošača u procesu energetskeg planiranja, kako bi se neizvesnost i rizik od neplaniranja procesa otklonio ili minimizirao.
- Primenom ABM modela moguće je modelirati i simulirati činioce koji na mikro nivou (nivou domaćinstva) utiču na donošenje odluke o načinu grejanja, kao što su interakcije između individualnih domaćinstava i interakcije domaćinstava sa okolinom.
- Primenom ABM modela omogućava se modeliranje uticaja šire društvene zajednice (energetska politika države i lokalnih samouprava, razmena informacija u okruženju i sl.) na ponašanje pojedinca (domaćinstva) vezano za pitanja iz domena energetike.
- Integracijom predloženog ABM modela sa klasičnim alatima za energetskeg modeliranje moguće je izvršiti sveobuhvatniju analizu uticaja energetskeg tranzicije u domaćinstvima na celokupan energetskeg sistem.

## 1.2. Naučne metode istraživanja

U prvom delu disertacije korišćene su metode analiza sadržaja i komparativna analiza, u cilju proučavanja i sistematizacije teorijskih i praktičnih znanja i tehničko-tehnoloških rešenja u domenu energetskeg planiranja. Ove metode treba da doprinesu analizi prednosti i nedostataka postojećih pristupa u modeliranju za podršku energetskeg planiranju.

Za potrebe prikupljanja podataka u disertaciji je korišćena analiza sadržaja zvaničnih statističkih podataka, naučnih i stručnih studija, strateških dokumenata na međunarodnom i nacionalnom nivou, kao i zakonskog okvira.

Za potrebe prikupljanja specifičnih podataka u istraživanju o načinu grejanja koji su potrebni za modeliranje i simulaciju, korišćeno je anketiranje, kao tehnička metoda ispitivanja socioloških fenomena. Pomoću ove metode podaci su prikupljeni tako što su ispitanicima, tj. članovima domaćinstva, postavljena unapred pripremljena pitanjima u vezi sa ciljem istraživanja.

Kao posebna tehnika modeliranja, u disertaciji je korišćeno modeliranje bazirano na agentima (*engl.* Agent-based modeling) (ABM) s ciljem izgradnje logičkog i matematičkog modela jednog objektivnog sistema, tj. sektora domaćinstva. ABM predstavlja vrstu računarskih modela koji simuliraju aktivnosti autonomnih agenata (pojedinačnih ili kolektivnih entiteta) i pružaju mogućnost da se procenjuju efekti njihovih aktivnosti na ceo sistem. U razvijenom ABM modelu agenti su predstavljeni kao domaćinstva. Razvijeni model treba da obezbedi sredinu za praćenje dinamičkih obrazaca ponašanja domaćinstava i pratećih procesa u energetske tranzicije grejanja u sektoru domaćinstva. Ovaj tip modela može da obezbedi tzv. pristup „odozdo na gore“, oslobođen od bilo kakvog uticaja sa hijerarhijski višeg nivoa. Izgradnja ABM simulacionog modela u konkretnom slučaju podrazumeva kreiranje programskog koda za izvršavanje simulacija energetske tranzicije u grejanju domaćinstava.

Istraživanje, merenje i evaluacija relevantnih parametara i rezultata dobijenih anketom, modeliranjem i simulacijama, obavljani su pomoću standardnih statističkih metoda.

### 1.3. Doprinosi disertacije

Zamene postojećih sistema grejanja za sisteme grejanja koji podrazumevaju veću zastupljenost OIE, efikasnije korišćenje energije i koji imaju manje negativnog uticaja na životnu sredinu, zahteva multidisciplinarni pristup, jer tranzicija ka modernijim tehnologijama u domaćinstvima nema samo tehničko-tehnološki aspekt. Ova tranzicija podrazumeva i promene političkih, ekonomskih, socioloških i organizacionih aspekata. Tranzicija u energetskom sektoru domaćinstva ima teško predvidljiv vremenski okvir i odvija se neravnomerno. Da bi nastupila masovnija energetska tranzicija u domaćinstvima, moraju se akumulirati odgovarajući uslovi u svim pomenutim aspektima.

Ambicija rada na ovoj disertaciji jeste da ponudi jedan inovativni pristup za podršku energetskom planiranju energetske tranzicije kroz razvoj simulacionog ABM modela, koji će biti zasnovan na empirijski prikupljenim podacima, i njegovoj daljoj integraciji sa alatima za energetske modeliranje. Na ovaj način, efekti i dometi političkih instrumenata za podsticanje tranzicije, koji mogu biti predloženi ili formulisani od strane donosilaca odluka i eksperata, mogu se testirati pre implementacije kroz tzv. „virtuelnu stvarnost“ predloženog modela u ovom pristupu.

Doprinosi ove doktorske disertacije najpre se ogledaju u sledećem:

- Nova i ažurirana saznanja o strukturi individualnih sistema grejanja u Srbiji (vrsti energenata, starosti sistema, potrošnji, energetske efikasnosti objekata i dr.).
- Nova saznanja o stavovima, navikama i ponašanju domaćinstava u Srbiji u vezi sa grejanjem.
- Formulisanje i izrada novog modela baziranog na agentima za podršku energetske tranzicije ka održivijem grejanju domaćinstava.
- Formulisanje funkcije korisnosti po kojoj domaćinstva donose odluku o načinu grejanja, a kojom se formuliše međuzavisnost između stavova domaćinstava, njihovih potreba i interakcija između samih domaćinstava.
- Analiza efekata političkih instrumenata za podršku energetske tranzicije u grejanju domaćinstava u Srbiji sa projekcijama strukture sistema grejanja prema načinu grejanja do 2050. godine.
- Izrada scenarija osetljivosti analiziranih političkih instrumenata u sektoru domaćinstva u Srbiji do 2050. godine;
- Proračun lokalne emisije ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>), ugljen-monoksida (CO) i oksida azota (NO<sub>x</sub>), kao posledice grejanja u sektoru domaćinstva, za analizirane instrumente i scenarije.
- Dalji doprinos teorijskom razvoju polja primene modeliranja na bazi agenata u energetici.

- Definisanje jedinstvenog pristupa za podršku donosiocima odluka u procesu energetske planiranja do koga se došlo integracijom istraživanja o grejanju domaćinstava, ABM modela i alata za energetske modeliranje.

#### **1.4. Sadržaj disertacije**

Rad na disertaciji podeljen je u osam tematskih celina (delova). U prvoj celini su prikazani predmet i cilj istraživanja, definisane osnovne hipoteze, navedene metode istraživanja i očekivani doprinosi disertacije. U drugoj celini izvršena je analiza pojma energetske tranzicije i ukratko je prikazan kontekst aktuelne tranzicije energetskih sistema Evropske unije i Srbije, uz trendove odgovarajućih energetskih pokazatelja. U trećoj celini dat je sažet prikaz teorijskih osnova i pregled literature koja se odnosi na energetske planiranje i metode modeliranja koje se u tu svrhu koriste. U četvrtoj celini je dat prikaz teorijske osnove modeliranja na bazi agenata u energetici, uz navođenje komparativnih prednosti i ograničenja koje ovaj metod modeliranja ima. U petoj celini prikazani su rezultati istraživanja koje je sprovedeno u cilju prikupljanja empirijskih podataka o stanju individualnog grejanja u domaćinstvima Srbije i perspektivi za energetske tranziciju. U šestoj celini prikazan je razvijeni simulacioni ABM model za potrebe projektovanja energetske tranzicije i analize političkih instrumenata kroz različite scenarije. Kao ulazni podaci za primenu modela, iskorišćeni su dobijeni rezultati iz istraživanja o individualnom grejanju u Srbiji. U sedmoj celini prikazan je pristup integracije ABM-a u energetske planiranje za podršku donosiocima odluka. Predloženi pristup je takođe testiran na slučaju sektora domaćinstva u Srbiji. U poslednjoj, osmoj celini, data su zaključna razmatranja, kroz sumiranje ostvarenih rezultata u disertaciji, diskusiju o dometima primene predloženog pristupa i predloge za dalje istraživanje.

## 2. ENERGETSKA TRANZICIJA

Energetsku tranziciju Smil (Smil, 2017) definiše kao „promenu strukture primarnog snabdevanja energijom, postepeni prelazak sa specifičnog obrasca snabdevanja energijom u novo stanje energetskeg sistema“. Sovacool (Sovacool, 2016) u analizi pojma energetske tranzicije navodi da se pod tim pojmom u najširem smislu uključuju promene u energetskeg sistemu koje dolaze zbog promene u izvorima energije, promene u tehnologijama i transformaciji primarne energije u korisne oblike energije.

Analizirajući energetske tranzicije kroz istoriju, nekoliko pokretača energetske tranzicije mogu se izdvojiti kao najčešći (Solomon i Krishna, 2011). Prvi, kada lokalno snabdevanje glavnim energentom u zajednici bude iscrpljeno ili preti da bude iscrpljeno. Najčešći primer za ovakve slučajeve jeste u slučaju neodrživog korišćenja drvne biomase, kao obnovljivog izvora ili u slučaju neobnovljivih izvora energije, pre svega fosilnih goriva. Drugi, koji može nastupiti kao pokretač i pre nego što dođe do nestašice, jeste rast cena dominantno zastupljenog izvora energije. Ukoliko rast cena bude toliki da drugi izvori energije postanu priuštiviji za zajednicu, može doći do drastičnog pada u korišćenju nekog izvora energije ili njegovog potpunog napuštanja. Treći pokretač koji se javljao jeste zagađenje životne sredine, najpre vazduha, ali i vode i zemljišta, kada posledice zagađenja usled korišćenja energije mogu postati veoma ozbiljne. Jedan od prvih tako drastičnih primera jeste zagađenje vazduha u Londonu 1952. godine, posle koga su britanske vlasti uvele zabranu za korišćenje uglja i pokrenule subvencionisanje za prelazak na prirodni gas, naftu ili električnu energiju (Martinez, 2021). Četvrti pokretač su tehnološke promene i inovacije koje izazivaju promena između izvora energije kako bi se iskoristile prednosti nove tehnologije (npr. elektrifikacija, gorivne ćelije, skladištenje električne energije itd.). Ovaj pokretač je u XXI veku sa globalnim konsenzusom oko potrebe za održivim razvojem dobio posebno na značaju. Poboljšanja efikasnosti u postojećoj ekonomskoj aktivnosti mogu ubrzati promene i dovesti do daljih ušteda troškova u procesu proizvodnje ili u zadovoljenju osnovnih ljudskih potreba.

Ako se energetska tranzicija kroz istoriju analizira sa aspekta promene glavnih energetskeg izvora, smatra se da je tranzicija sa drveta, kao glavnog energetskeg izvora na fosilna goriva, počela početkom XVIII veka i da su fosilna goriva preuzela lidersku poziciju do početka XX veka. To znači da je prva energetska tranzicija, globalnog karaktera, trajala oko dva veka. U tom periodu, ugalj se postavio kao dominantan izvor energije koji je svoju veću primenu našao u parnim mašinama. Iako je prva parna mašina (Thomas Newcomen, 1712. godina) za pogonsko gorivo koristila drvo i drveni ugalj (Živković i Ivezić, 2019), ugalj je brzo postao osnovno gorivo. Naredna tranzicija koja je usledila jeste prelazak sa uglja na naftu kao glavni izvor energije. Za ovu tranziciju, ključan događaj je pronalazak motora sa unutrašnjim sagorevanjem 1860. godine i kasnije modifikacije i patenti koji su usledili. Najveći porast proizvodnje usledio je nakon Drugog svetskog rata, kada nafta preuzima primat, najvećim delom zbog korišćenja u drumskom saobraćaju (Živković i Ivezić, 2019). Stalno povećanje potražnje za energijom, pojava oskudice nafte i problemi u snabdevanju 70-ih i 80-ih godina XX veka (Prva i Druga naftna kriza), između ostalog dovode i do intenzivnije upotrebe prirodnog gasa za proizvodnju električne energije, za grejanje i kao industrijsku sirovinu. Takođe, prirodni gas je kasnije dobio na značaju i zbog klimatskih promena i ekoloških problema izazvanih korišćenjem uglja, nafte i drugih energetskeg resursa sa visokim sadržajem ugljenika, gde je prirodni gas dobio ulogu tzv. “mosta“ ka niskougljeničnoj ekonomiji oslonjenoj na OIE i efikasnije tehnologije (Weissman i dr., 2016).

Aktuelna energetska tranzicija nastaje kao posledica suočavanja sa globalnim klimatskim promenama. Svetska zajednica je primorana da pređe na održivi energetskeg sistem, kao i da bolje upravlja potražnjom i snabdevanjem energijom. Ovo zahteva kombinaciju primene mera energetske efikasnosti, korišćenja OIE (vetar, solarna, biomasa, hidroelektrana itd.), uvođenje tehnologije hvatanja ugljenika koji nastaje iz postojeće upotrebe fosilnih goriva i mogući rast upotrebe nuklearne energije (Solomon i Krishna, 2011). Ključni činilac u aktuelnoj energetskeg tranziciji treba da bude električna energija, koja se može proizvesti iz različitih OIE. Evropska unija (EU) trenutno



zadovoljava oko 20-25% potražnje za energijom kroz električnu energiju, a projekcije ukazuju da bi daljom elektrifikacijom energetske sektora to moglo da bude i više od 50% u 2050. godini (Robinson, 2022).

Uvažavajući sve navedene promene u svetskoj energetici, mogu se identifikovati tri opšte karakteristike energetske tranzicije kroz istoriju, a koje se odnose na:

1. Vrstu energenata: energetska tranzicija ima tok od visokougleničnih ka niskougleničnim energentima;
2. Metod proizvodnje: energetska tranziciju karakteriše usložnjavanje postupaka dobijanja primarnih energetske izvora i veće iskorišćenje resursa;
3. Korišćenje energije: energetska tranzicija je tekla od prvobitno direktne upotrebe energenata ka složenim transformacijama, kao na primer kod proizvodnje električne energije.

Kroz istoriju, procesi energetske tranzicije imali su prevashodno lokalni i regionalni karakter, a same odluke o prelasku na nove energente ili tehnologije su bile sa ograničenom ili gotovo nikakvom koordinacijom (Smil, 2010). Ideja o globalnoj energetske tranziciji je novija tekovina ljudske civilizacije i posebno dobija na značaju od međunarodnih konferencija i sporazuma koji su za cilj imali smanjenje antropogenog uticaja klimatskih promena i energetske tranziciju ka niskougleničnim energetske sistemima (Okvirna konvencija UN o klimatske promenama 1994. godine (UN, 1994), Kjoto protokol 1997. godine (UN, 1997), Pariski sporazum o klimatske promenama 2015. godine (UN, 2015), Evropski zeleni dogovor (EC, 2019a) i dr.).

Ograničene rezerve fosilnih goriva, degradacija životne sredine, klimatske promene, porast broja stanovnika i standarda života, najznačajniji su izazovi sa kojima se energetske sistemi danas suočavaju. Iako su evidentno energetske sistemi uvek u procesu modernizacije i transformacije, navedeni izazovi, kao i složenost postojećih tehnoloških sistema, globalna trgovina, umreženost i međuzavisnost energetske sistema, određuju kompleksnost i brzinu sadašnje energetske tranzicije. Navedeni pokretači energetske tranzicije danas su intenzivniji, a periodi između krupnih promena u energetske sistemima su sve kraći (Singh i dr., 2019).

Trenutna energetska tranzicija obuhvata reorganizaciju energetske sistema, dominantno baziranih na fosilnim gorivima, u sisteme koji su usmereni na veću primenu i diversifikaciju OIE, veću energetske efikasnost i veće energetske uštede (IRENA, 2018a). Napuštanje fosilnih izvora energije, čiju proizvodnju odlikuje predvidljivost i mogućnost skladištenja energenata, uz značajno uvođenje OIE koje odlikuje varijabilnost (Lund, 2014), izaziva dodatne izazove za kratkoročno i dugoročno energetske planiranje aktuelne energetske tranzicije.

## 2.1. Energetska tranzicija u Evropskoj uniji

Među najambicioznijim akterima u sprovođenju globalne energetske tranzicije jeste Evropska unija (EU) (EC, 2018). Novi regulatorni okvir EU uključuje obavezujući cilj od 32% udela OIE u energetske miksu do 2030. godine. Ovaj, tzv. Četvrti energetske paket, usvojen 2019. godine, postavlja pred EU cilj klimatske neutralnosti (nultu neto emisiju) do 2050. godine (EC, 2020a). Evropska komisija je 2020. godine, u sklopu tzv. „Evropskog zelenog dogovora“, najavila da će u narednoj deceniji biti uloženi 1 trilion € u politiku klimatske neutralnosti do 2050. godine i smanjenje emisije gasova staklene bašte za 55% do 2030. godine u odnosu na nivo iz 1990. godine (Fetting, 2020).

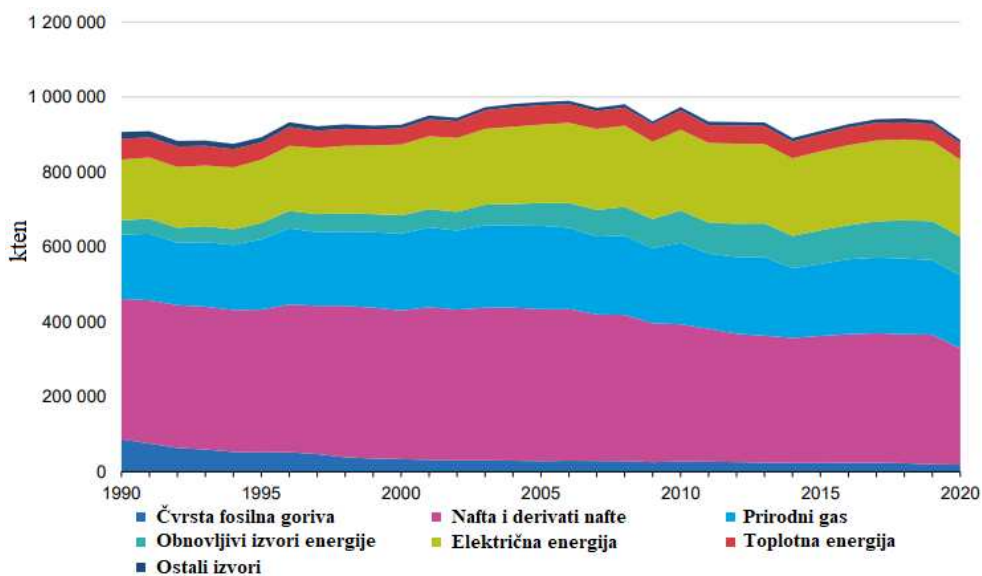
Navedene ciljeve usložnjava heterogenost nacionalnih energetske sistema u pogledu strukture energetske miksa, nivoa uvozne zavisnosti, nivoa bruto društvenog proizvoda, kao i nivoa tehnološkog razvoja država članica, kojih je danas ukupno dvadeset sedam (EU 27). Kada se članice EU posmatraju pojedinačno, uslovno se države mogu svrstati u pojedine klastere, prema razlikama u brzini i motivaciji sa kojom one teže uspostavljanju niskougleničnih energetske sistema. Neke zemlje doživljavaju obnovljivu energiju kao priliku za industrijski rast, koja istovremeno diverzifikuje njihov energetske miksa i ublažava emisije gasova staklene bašte. Za ove zemlje evropska

saradnja predstavlja dobro okruženje za zajedničko suočavanje sa izazovima energetske tranzicije, što podrazumeva i veću povezanost njihovih prenosnih mreža. Druge zemlje međutim, doživljavaju napore svojih zelenih suseda i partnera u EU kao smetnju koja dovodi u pitanje sigurnost snabdevanja po pristupačnim cenama i donosi probleme sa mrežom i nestabilnost cena bez ikakvih dodatnih prihoda ili beneficija za njihove nacionalne ekonomije (Mata Perez i dr., 2019).

Osim borbe protiv klimatskih promena, pobornici niskougljeničnog energetskog sistema EU nalaze argumentaciju za aktuelnu energetska tranziciju i u činjenici da je EU neto uvoznik energije i da je energetska zavisnost posebno izražena kod nafte i prirodnog gasa. Stanovište EU je da politika koju predlaže i vodi u oblasti smanjenje antropogenog uticaja na klimatske promene, obezbeđuje dugoročno postizanje energetske nezavisnosti, a šire posmatrano i energetske bezbednosti svih članica.

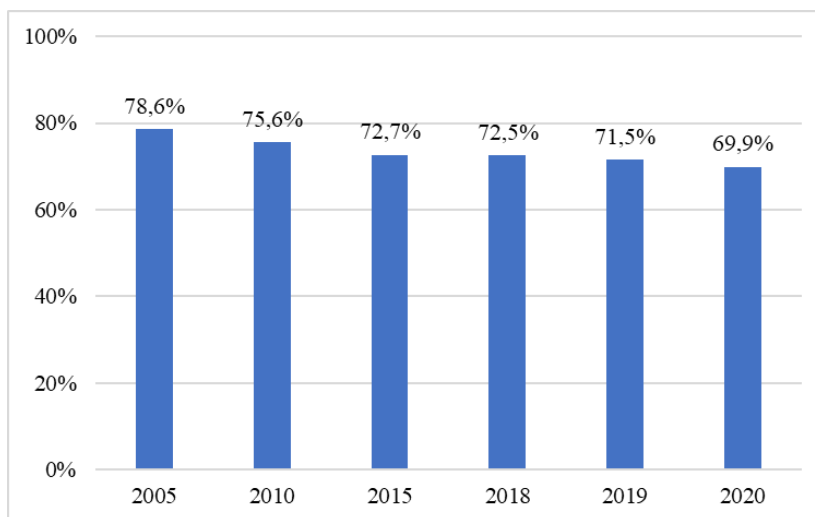
Dugoročni proklamovani ciljevi imaju potencijal da smanje potrebu za uvozom nafte i prirodnog gasa, odnosno da energetska sistem učine samodovoljnim kada su u pitanju energetska potreba članica EU (Flaherty i Filho, 2013). Energetska tranzicija EU je iz navedenih razloga usmerena na razvoj kapaciteta za proizvodnju korisnih oblika energije iz OIE, koji su lokalno dostupni, i povećanje energetske efikasnosti. Kako bi se proklamovani ciljevi energetske politike ostvarili efikasno i bez negativnih posledica po privredu i stanovništvo, jasno je da energetska sistemi članica EU moraju proći kroz temeljnu i finansijski podržanu energetska tranziciju.

Premda je istaknuto da u EU postoje izvesne razlike u pogledu nacionalnih energetska politika, procene efekata aktuelne politike energetska tranzicije EU se vrše kumulativno, kroz zvaničnu statistiku, tj. energetska bilans, i kroz energetska pokazatelje. Ako se pogleda trend u finalnoj potrošnji energije u EU od 1990. do 2020. godine (Slika 1), uočava se da je udeo čvrstih fosilnih goriva od 1990. godine opao sa 9,6% na 2,1% u 2020. godini. Sa druge strane, udeo OIE energije je u istom periodu porastao sa 4,3% na 21,9%. Najviše udela ubedljivo imaju nafta i derivati nafte (35%), a zatim slede električna energija (23,2%) i prirodni gas (21,9%).



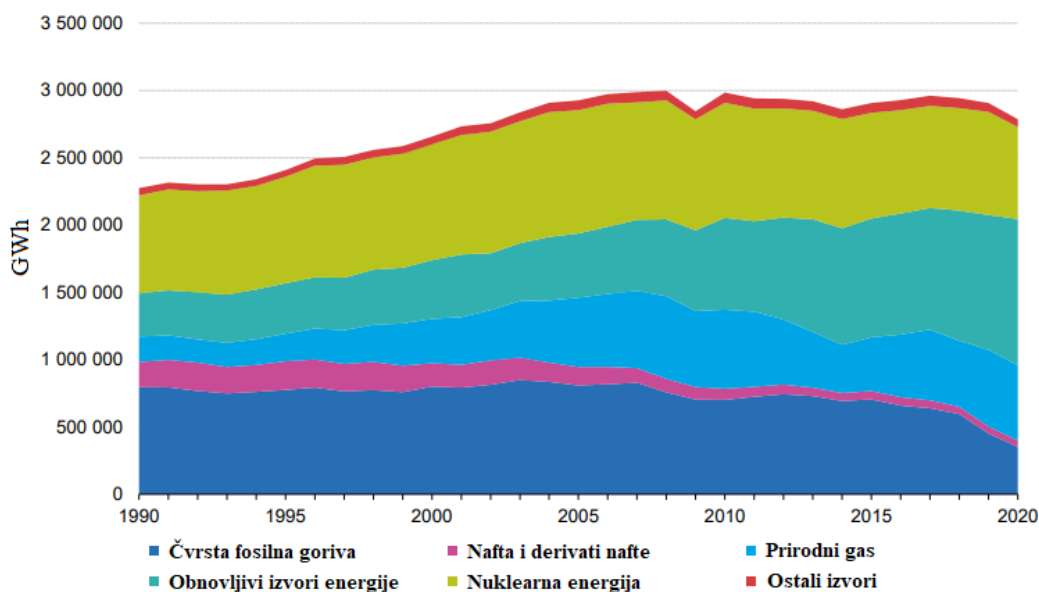
Slika 1. Finalna potrošnja energije za energetska svrhe po energentima – EU 27 (Eurostat, 2022a)

Udeo fosilnih goriva u ukupnoj raspoloživoj energiji (*engl.* Primary Energy Supply) je i dalje visok (Slika 2). U 2020. godini iznosio je 69,9%. Međutim, primetan je stalan pad udela od 2005. godine, kada su fosilna goriva beležila udeo od 78,6%.



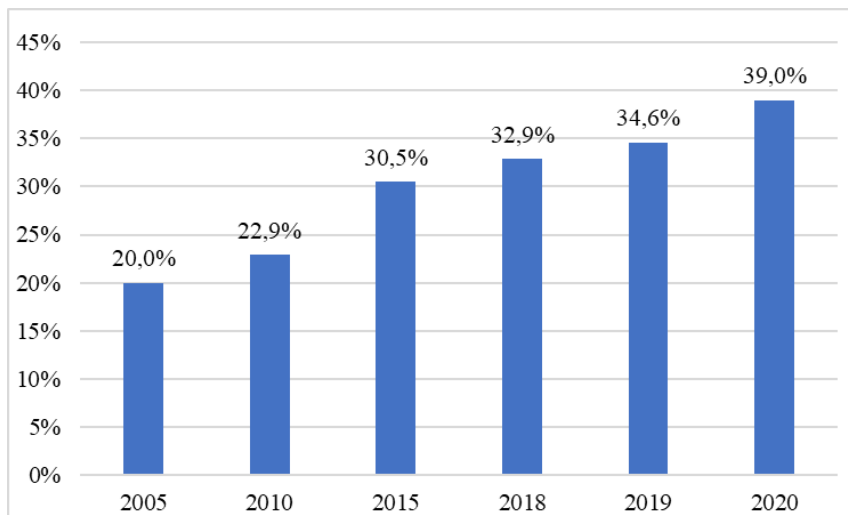
Slika 2. Udeo fosilnih goriva u ukupnoj raspoloživoj energiji – EU 27 (Eurostat, 2022a)

Veći intenzitet energetske tranzicije od fosilnih goriva ka OIE očekuje se u narednim godinama i decenijama, a to donosi novu dinamiku trenutnim energetske sistemima, uključujući fluktuacije ponude i geografski decentralizovaniju proizvodnju. Kada se analizira potencijal energetske sistema za prelazak na OIE, prvo šta se nameće kao zaključak jeste da najveći potencijal leži u elektroenergetskom sektoru. Električna energija je već sada prepoznata od članica EU kao vid energije koji najviše može da doprinese dekarbonizaciji energetske sistema. Slika 3 prikazuje trend proizvodnje električne energije prema energentima od 1990. do 2020. godine. Najveći rast su imali OIE, sa 14% u 1990. godini, na 39% u 2020. godini i prirodni gas, sa oko 8% 1990. godine, na oko 20% u 2020. godini. Istovremeno, čvrsta fosilna goriva beleže najveći pad, sa oko 35% u 1990. godini, na oko 12,6% u 2020. godini. Nuklearna energija, pre svega zbog odluke pojedinih država članica da pogase nuklearne elektrane, a ne kao deo zajedničke politike EU prema nuklearnoj energiji, beleži pad sa 32% u 1990. godini, na oko 24,6% u 2020. godini. Derivati nafte u istom periodu beleže pad sa 8,3% na 1,7%.



Slika 3. Bruto proizvodnja električne energije – EU 27 (Eurostat, 2022a)

Podsticajne mere za OIE su u poslednjih 10 godina dovele do rasta udela sa 22,9% na oko 39% obnovljive energije u proizvodnji električne energije u EU u 2020. godini (Slika 4), čime su OIE preuzeli dominaciju u odnosu na fosilna goriva kod proizvodnje električne energije. Porastu postojeće proizvodnje električne energije iz OIE posle 2010. godine, najviše su doprineli energija vetra i solarna energija, ali i čvrsta biogoriva (Jones, 2021).



Slika 4. Udeo OIE u proizvodnji električne energije – EU 27 (Eurostat, 2022a)

Da bi se dalje iskoristio potencijal koji leži u proizvodnji električne energije iz OIE, insistira se na daljoj elektrifikaciji energetskog sistema država članica. Sektori gde leži značajan, još uvek nedovoljno iskorišćen potencijal za elektrifikaciju jesu sektor saobraćaja i sektor grejanja i hlađenja (EC, 2022).

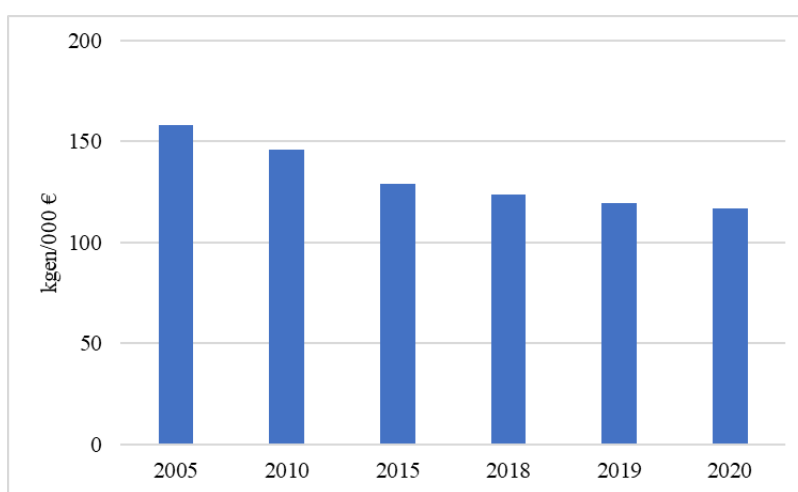
U sektoru saobraćaja udeo OIE u 2020. godini je bio 10,2% OIE, čime je ostvaren cilj od zacrtanih 10%. Ipak, i dalje apsolutnu dominaciju imaju fosilna goriva u ovom sektoru, a oko 1/4 gasova staklene bašte u EU potiče od saobraćaja i on ujedno predstavlja veliki izvor zagađenja vazduha. Dalji koraci podrazumevaju povećanje broja električnih automobila, razvoj železničkog saobraćaja i podsticanje javnog prevoza (EU, 2017).

Sektor grejanja i hlađenja je ostvario pomak u korišćenju OIE od 2004. godine, kada je udeo OIE bio 11,7%, a 2020. godine taj udeo je bio 23,1%. Dalji prodor OIE u ovaj sektor predviđa se pre svega kroz dalju elektrifikaciju, tačnije primenu toplotnih pumpi za grejanje, kao i primenu metoda za skladištenje toplotne energije (EC, 2022). Pojedinačno gledano, grejanje stambenog prostora i zagrevanje vode u domaćinstvima predstavlja 78% ukupne potrošnje energije u ovom sektoru (Eurostat, 2022b).

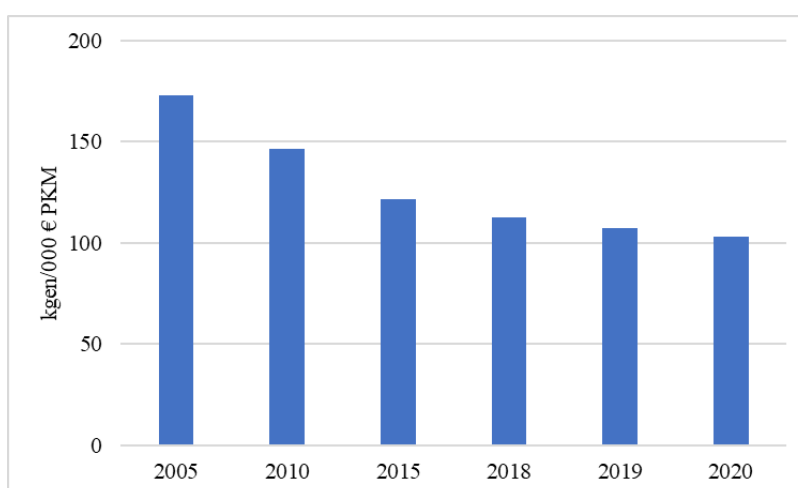
Grejanje u domaćinstvima se apostrofira kao najveći izazov za planiranje energetske tranzicije ka efikasnijem korišćenju energije i većem prodoru OIE u sektor domaćinstva. Kao najbrže i najmasovnije sprovedene tranzicije u grejanju u evropskim zemljama navode se: energetska tranzicija u Velikoj Britaniji od 1960. do 1977. godine, koja je podrazumevala prelazak na prirodni gas kao glavni energent; energetska tranzicija u Danskoj od 1976. do 2011. godine, koja je podrazumevala razvoj sistema daljinskog grejanja u kombinaciji sa proizvodnjom električne energije (CHP postrojenja) i instalaciju toplotnih pumpi; energetska tranzicija u Finskoj od 2000. do 2018. godine, koja je podrazumevala zamenu konvencionalnih sistema grejanja zasnovanih na fosilnim gorivima toplotnim pumpama (Sovacool i Martiskainen, 2020). Ove tri tranzicije se ističu po svom obimu, dubini i brzini po kojoj su se odvale, ali kao što se može uvideti, vremenski interval tranzicije u

grejanju domaćinstava ne može se okarakterisati kao kratak. Za tako nešto, potrebno je između 18 i 35 godina, što treba imati na umu i kod planiranja aktuelne energetske tranzicije u ovom sektoru.

Kada se analizira energetska efikasnost, u međunarodnoj statistici se koristi pokazatelj pod nazivom „energetski intenzitet ekonomije“. Energetski intenzitet se može posmatrati kao aproksimacija energetske efikasnosti ekonomije jedne zemlje (ili u ovom slučaju grupe zemalja) i pokazuje količinu energije koja je potrebna za proizvodnju jedinice bruto društvenog proizvoda (BDP). Na Slikama 5 i 6 je prikazan trend ovog pokazatelja od 2005. do 2020. godine. Na Slici 5 prikazana vrednost predstavlja uloženu energiju (izraženu u kgen) po jedinici proizvedenog BDP-a (izraženu u 1000 €), a na Slici 6 je ovaj pokazatelj korigovan kroz paritet kupovne moći, gde je konverzijom vrednosti BDP-a po određenim stopama izvršeno ujednačavanje razlika u kupovnoj moći i nivou cena. Razlozi za uočena poboljšanja u energetskom intenzitetu su pre svega opšti pomak od industrije ka privredi zasnovanoj na uslugama u najrazvijenijim zemljama EU, prelazak unutar same industrije na manje energetske intenzivne aktivnosti i tehnologije, zatvaranje neefikasnih energetskih postrojenja i izgradnja efikasnijih.



Slika 5. Energetski intenzitet ekonomije – EU 27 (Eurostat, 2022a)



Slika 6. Energetski intenzitet ekonomije prema PKM – EU 27 (Eurostat, 2022a)

Sumirajući efekte dosadašnje politike energetske tranzicije u EU, može se zaključiti da je EU ostvarila pomak ka proklamovanim ciljevima energetske tranzicije. Energetski sistem u globalu gledano je

„zeleniji“ i efikasniji nego pre dvadeset godina. Međutim, ono što i dalje ostaje izazov za EU jeste zavisnost od fosilnih goriva, dominantno nafte i prirodnog gasa. Domaće energetske rezerve se smanjuju i ne mogu da zadovolje energetske potrebe, posebno u sektoru saobraćaja, sektoru industrije i sektoru domaćinstva, a proces elektrifikacije ovih sektora i „ozelenjavanja“ energetike još nije tog obima da bi mogao da pruži jedini oslonac.

## 2.2. Energetska tranzicija u Srbiji

Ciljevi energetske politike Republike Srbije i načini njenog ostvarivanja utvrđeni su Zakonom o energetici. Politika koja se tiče korišćenja OIE i njihovog korišćenja, kao i energetska politika efikasnijeg korišćenja energije, definisane su i kroz posebne zakone - Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije i Zakon o efikasnom korišćenju energije (RS, 2021a), (RS, 2021b). Od važnosti za politiku energetske tranzicije u Srbiji jeste i Zakon o klimatskim promenama (RS, 2021c). Aktivnosti koje se sprovode u cilju ostvarenja dugoročnih ciljeva energetske tranzicije, odnosno bližeg razrađivanja nacionalne energetske politike i drugih pitanja od značaja za nacionalni energetski sistem, definisani su Strategijom razvoja energetike Republike Srbije do 2025. sa projekcijama do 2030. godine.

Istaknuto mesto u proklamovanim strateškim ciljevima zauzima energetska tranzicija ka održivoj energetici, koja je predviđeno da se ostvaruje kroz: obezbeđivanje uslova za unapređenje energetske efikasnosti; stvaranje ekonomskih, privrednih i finansijskih uslova za povećavanje udela energije iz obnovljivih izvora energije; stvaranje institucionalnih, finansijskih i tehničkih pretpostavki za korišćenje novih izvora energije (energije vetra, Sunca, biomase, biogasa i sl.); unapređenje stanja i sistema zaštite životne sredine; uspostavljanje povoljnijih zakonskih, institucionalnih i logističkih uslova za dinamičnije investiranje u energetiku (RS, 2015).

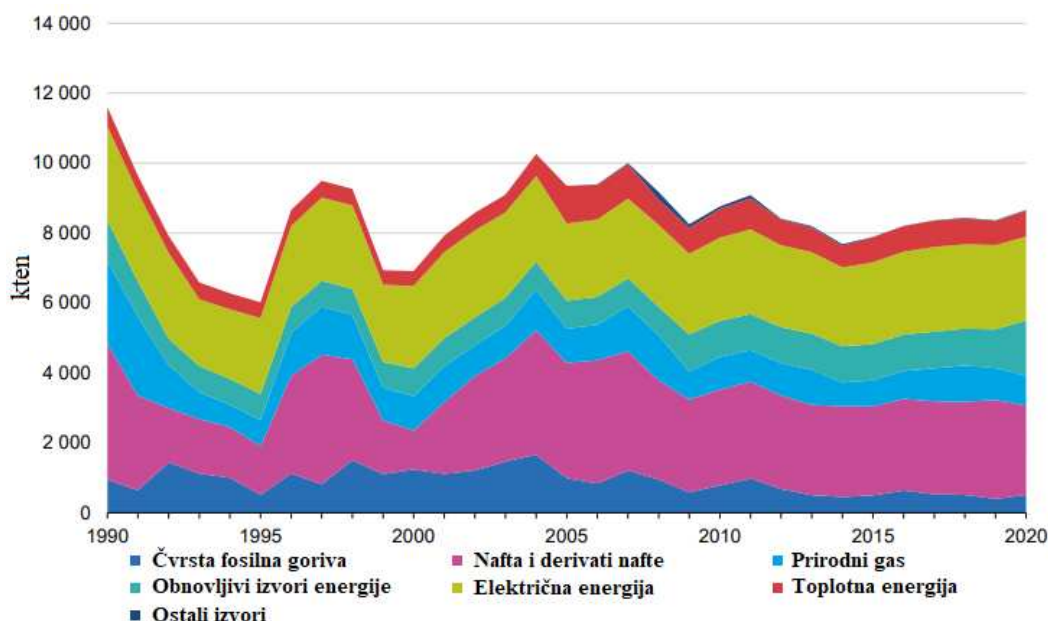
Pored navedenog okvira nacionalne energetske politike, Republika Srbija je donela Zakon o ratifikaciji Ugovora o osnivanju Energetske zajednice 2006. godine (RS, 2006), čime je postala potpisnica Ugovora o osnivanju Energetske zajednice. Ovim se Srbija se obavezala na implementaciju i usaglašavanje pravnog okvira EU u oblasti energetike, energetske tranzicije, klime, zaštite životne sredine, tržišnih uslova i sl. Takođe, Republika Srbija je 2008. godine potpisala Sporazum o stabilizaciji i pridruživanju (SSP) sa EU, koji je stupio na snagu 2013. godine (MEI, 2013). Ovim Sporazumom je potvrđena namera Srbije za članstvom u EU.

Kada je reč o najnovijem usaglašavanju sa politikom EU koja se, između ostalog, tiče i energetske tranzicije, treba istaći da je Srbija preuzela obavezu izrade Nacionalnog energetskog i klimatskog plana do 2030. godine, kojim treba da se preciznije definišu ciljevi vezani za dekarbonizaciju energetskog sistema, povećanje udela OIE i veće energetske efikasnosti. Ta obaveza proističe iz regulatornog paketa iz 2019. godine, poznatog kao „Čista energija za sve Evropljane“ sa ciljem ispunjenja obaveza iz Pariskog sporazuma. Takođe, EU je 2020. godine, u sklopu već pomenutog tzv. „Evropskog zelenog dogovora“ dodatno korigovala mere vezane za dekarbonizaciju, u cilju da Evropa postane ugljenični neutralan kontinent do 2050. godine. U okviru ove inicijative, EU je definisala "Zelenu agendu za Zapadni Balkan" sa kojom se Srbija saglasila u Sofiji 2020. godine. Neke od mera koje je Srbija prihvatila su (EC, 2020b):

- Usklađivanje sa klimatskim zakonom EU;
- Definisane energetske i klimatske ciljeve do 2030. u skladu sa pravnim okvirom Energetske zajednice i pravnom tekovinom EU, kao i razvoj i primena Nacionalnih energetskih i klimatskih planova;
- Nastavak usklađivanja sa Sistemom za trgovanje emisijama EU, kao i uvođenje drugih modela za oporezivanje emisija, kako bi se promovisala dekarbonizacija u regionu;
- Saradnja u pripremi procene socio-ekonomskog uticaja dekarbonizacije u cilju pravedne tranzicije;
- Davanje prioriteta energetske efikasnosti i njeno poboljšanje u svim sektorima;
- Povećanje udela OIE i obezbeđivanje neophodnih uslova za investiranje;

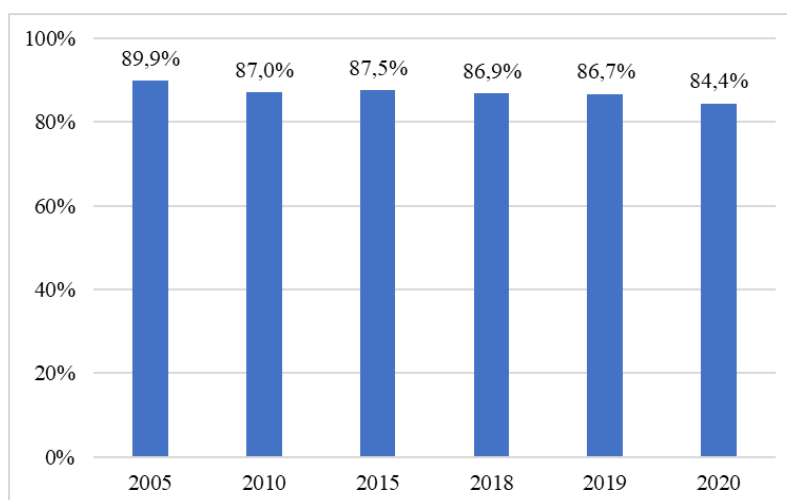
- Smanjenje i postepeno ukidanje subvencija za ugalj, strogo poštujući pravila državne pomoći;
- Aktivno učestvovanje u inicijativi Regioni uglja u tranziciji za Zapadni Balkan.

Ukupna potrošnja finalne energije za energetske svrhe u Srbiji 2020. godine iznosila je 8.658,3 kten. Finalna potrošnja energije za energetske svrhe, u periodu 1990. – 2020. godine, po gorivima i energentima je prikazana je na Slici 7. Može se uočiti da u razmatranom periodu od 1990. godine nije bilo većih promene u strukturi korišćenih energenata.



Slika 7. Finalna potrošnja energije za energetske svrhe po energentima – Srbija (Eurostat, 2022a)

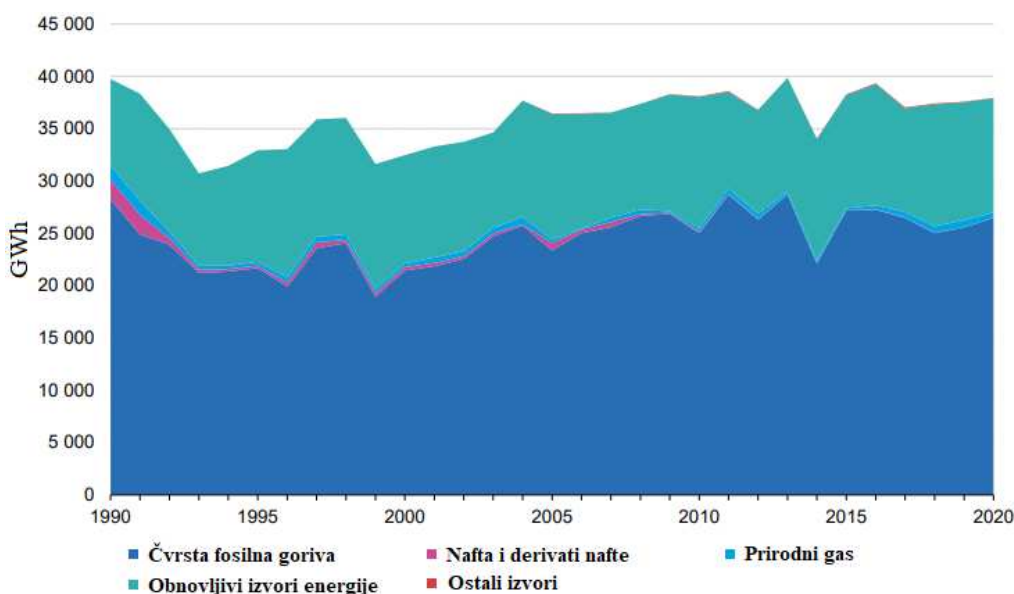
Udeo fosilnih goriva u ukupnoj raspoloživoj energiji u Srbiji je značajan. U 2020. godini taj udeo je iznosio oko 84,4%. Slične vrednosti su karakterisale i prethodni period (Slika 8). Vrednost ovog pokazatelja je viša od proseka Evropske unije, kao i od njegove vrednosti u zemljama u regionu Zapadnog Balkana (Eurostat, 2022a).



Slika 8. Udeo fosilnih goriva u ukupnoj raspoloživoj energiji – Srbija (Eurostat, 2022a)

Kada su u pitanju OIE u energetske sektoru, oni se danas u najvećoj meri koriste za proizvodnju električne i toplotne energije. Iako izgradnja postrojenja za proizvodnju električne energije iz OIE raste, dominantna proizvodnja električne energije u Srbiji je iz lignita. U 2020. godini termoelektrane su učestvovala sa blizu 70% u ukupnoj proizvodnji električne energije, a hidroelektrane sa blizu 26%, dok su termoelektrane-toplane, industrijske energane, solarne i vetroelektrane zajedno učestvovala sa nešto manje od 5% (RZS, 2022a).

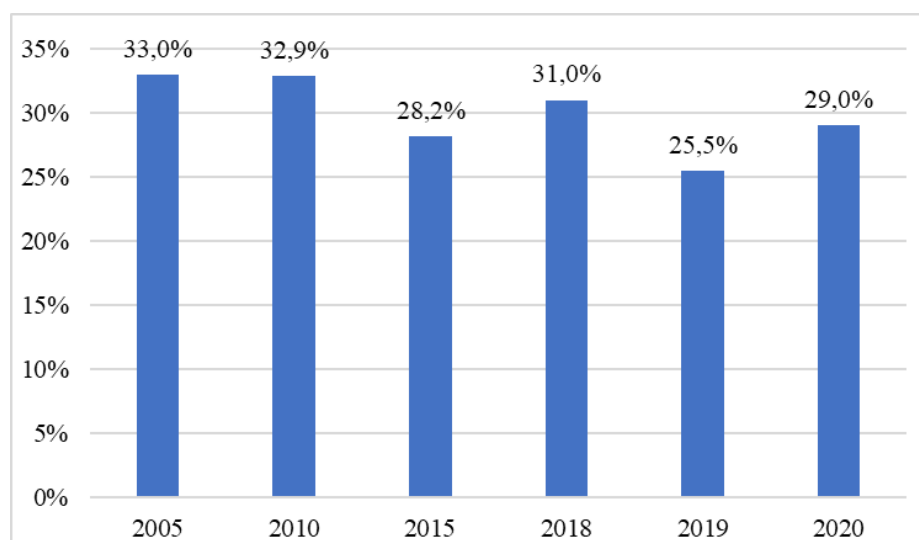
Iako su izgrađeni novi kapaciteti na solarnu energiju i energiju vetra, može se uočiti da u razmatranom periodu nema značajnijih promena kada je u pitanju struktura proizvodnje električne energije (Slika 9). Najveći skok u proizvodnji električne energije u odnosu na moment kada su se prvi put pojavile na mreži su ostvarile vetroelektrane. Proizvedena električna energija u 2016. godini iz vetroelektrana je bila oko 26 GWh, dok je u 2020. godini bila oko 976 GWh, što je skoro 38 puta više (RZS, 2022a).



Slika 9. Proizvodnja električne energije – Srbija (Eurostat, 2022a)

U ukupnoj proizvodnji električne energije, OIE su učestvovali sa oko 29% u 2020. godini (Slika 10). Može se uočiti da od 2005. do 2020. godine postoji i blagi pad udela OIE u proizvodnji električne energije, izazvan varijabilnošću u proizvodnji hidroenergije.



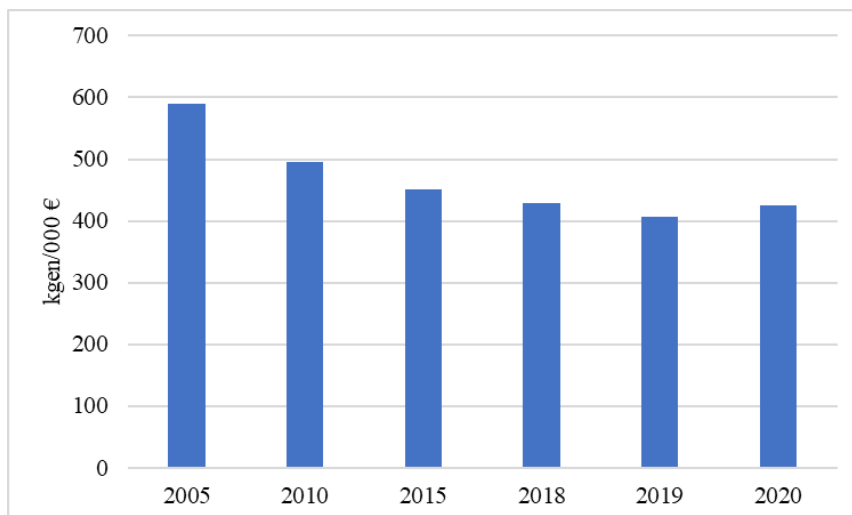


Slika 10. Udeo OIE u proizvodnji električne energije – Srbija (Eurostat, 2022a)

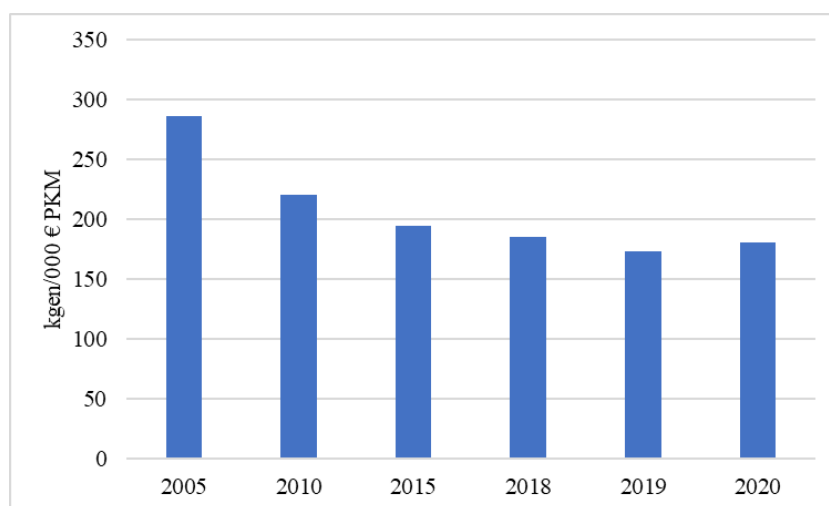
Kada je u pitanju upotreba OIE, pored hidroenergije koja se koristi za proizvodnju električne energije, značajan energetska izvor u Republici Srbiji predstavlja drvena biomasa, koja se koristi pre svega za potrebe grejanja u domaćinstvima, a čine je ogrevno drvo, pelet i briketi. Energija proizvedena iz geotermalne energije se isključivo koristi za grejanje, ali u zanemarljivom iznosu u odnosu na drvenu biomasu. Sektorski gledano, sektor domaćinstva je u 2020. godini potrošio 3.488 kten, što čini oko 40% ukupne finalne potrošnje energije u zemlji, a u periodu od 2015. do 2019. godine taj udeo je iznosio od 34-36%, što ga svakako svrstava u energetska sektor sa najvećom potrošnjom u Srbiji. U sektoru domaćinstva najviše se troši drvena biomasa sa oko 38% u ukupnoj potrošnji. Zatim sledi električna energija sa oko 34% i toplotna energija sa oko 12,5% učešća. Ugalj i prirodni gas učestvuju sa po oko 7%.

Od ukupne potrošnje energije, oko 78% energije u sektoru domaćinstva se koristi za grejanje stambenog prostora i pripremu tople vode. Ostatak energije se uglavnom koristi za kuvanje (oko 7%), osvetljenje i potrošnju električnih aparata (oko 14%) (Eurostat, 2020). Oko polovine domaćinstava u Srbiji koristi ogrevno drvo za grejanje prostora (Pavlović i dr., 2021). Najviše su zastupljeni lokalni sistemi grejanja, kao što su šporeti i peći na čvrsta goriva, koji predstavljaju zastarele tehnologije, niže efikasnosti u odnosu na modernije sisteme grejanja. Drugi najčešći način grejanja je daljinsko grejanje, koje je većinom zastupljeno u urbanim sredinama. Električna energija je na trećem mestu po zastupljenosti, ali je i najčešći dodatni izvor energije za grejanje (RZS, 2021a). Korišćenje električne energije za grejanje takođe odlikuje primena starijih tehnologija za grejanje, u vidu električnih peći i grejalica, a u znatno manjem udelu je prisutno grejanje na toplotne pumpe. Daljinsko grejanje u Srbiji je počelo intenzivnije da se razvija u drugoj polovini XX veka. U početku su korišćeni mazut i ugalj, a kasnije počinje da se koristi prirodni gas. Prema podacima iz 2020. godine, procenat povezanih domaćinstava u urbanim sredinama na SDG je 48,92% (TOPS, 2021) i postoji trend rasta broja priključaka. U strukturi energenata u 2020. godini najdominantniji je prirodni gas sa 81,21%, a zatim slede naftni derivati sa 9,58%, ugalj 8,75%, a OIE sa 0,46%. Trenutne aktivnosti su usmerene na dalju konverziju mazuta i uglja pre svega prirodnim gasom, ali i biomasom. U SDG u Srbiji do 2020. godine nije bilo instaliranih kapaciteta na toplotne pumpe.

Na Slikama 11 i 12 su prikazani trendovi promene energetska intenziteta (iskazanog prema vrednosti BDP-a i prema BDP-u korigovanom prema paritetu kupovne moći - PKM). Pokazatelji energetska efikasnosti energetska sistema Republike Srbije ukazuju na relativno visoku energetska potrošnju po jedinici BDP-a u poređenju sa zemljama EU. U odnosu na proseka EU 27, ovaj pokazatelj za Srbiju je veći 3,6 puta (odnosno za oko 75% ako se BDP koriguje prema paritetu kupovne moći - PKM). Ono što je pozitivno je trend smanjenja ovih pokazatelja u razmatranom periodu.



Slika 11. Energetski intenzitet ekonomije – Srbija (Eurostat, 2022a)



Slika 12. Energetski intenzitet ekonomije prema PKM – Srbija (Eurostat, 2022a)

Uprkos izvesnom napretku na polju izgradnje novih kapaciteta iz OIE, Republika Srbije je veoma zavisna od fosilnih goriva. Ugalj je ubedljivo najvažniji domaći resurs, pre svega u proizvodnji električne energije. Pokazatelji energetske efikasnosti energetskog sistema Republike Srbije ukazuju na relativno visoku energetske potrošnju po jedinici BPD-a. Može se zaključiti da u periodu od kraja XX veka do danas, politika energetske tranzicije nije dovoljno zaživela u praksi i da još nisu ostvareni uslovi za bržu tranziciju ka efikasnijem i „zelenijem” energetskom sistemu Srbije.

### 3. ENERGETSKO PLANIRANJE I MODELIRANJE

Energetsko planiranje je uslovljeno kontekstom i ciljem zbog koga se sprovodi. Međutim, jedno uobičajeno značenje energetskog planiranja jeste da je to proces definisanja politika koje će pomoći u upravljanju razvojem lokalnog, nacionalnog, regionalnog ili čak globalnog energetskog sistema. Planiranje u ovoj sferi je tradicionalno igralo snažnu ulogu u postavljanju okvira za regulativu u energetskom sektoru i vođenje politike (Bhatia, 2014).

Energetsko planiranje se često sprovodi u okviru vladinih organizacija (na nivou države) (Johannsen i dr., 2021), ali ga mogu sprovoditi i velike energetske kompanije kao što su kompanije u elektroprivredi ili proizvođači nafte i gasa. Danas je praksa da se energetsko planiranje sprovodi uz aktivno učešće i doprinose različitih zainteresovanih strana, kao što su specijalizovane vladine agencije, lokalna komunalna preduzeća, nevladin sektor, akademska zajednica, privatni subjekti, lokalna zajednica i druge interesne grupe.

U okviru energetskog planiranja ne postoje ograničenja u smislu broja planova, nivoa planiranja, pristupa planiranju. U praksi može postojati više tipova planova prema oblastima za koje se izrađuju, kao npr. planiranje unapređenja energetske efikasnosti, planiranje korišćenja OIE i sl., uz istovremeno postojanje planskih dokumenata različitog hijerarhijskog nivoa. Obično u većini oblasti društva, privrednih grana, organizacija, postoji nekoliko planova u istom trenutku, koji se razlikuju u nivou, obima i vremenskom okviru.

Nekoliko najčešće korišćenih tipova planiranja koji se razlikuju u literaturi su: strateško planiranje, taktičko planiranje i operativno planiranje (Bloom i Manefee, 1994). Svedeno u kojoj oblasti se planiranje sprovodi, ova klasifikacija može biti aktuelna, pre svega u cilju bližeg pojmovnog određenja i postavljanja granica u procesu planiranja.

Strateško planiranje ili strateški plan je veoma širokog obima i fokusira se na osnovne ciljeve i planove za vođenje opšteg pravca bilo koje organizacije ili sistema. Kroz ovo planiranje definišu se vizije budućnosti i identifikuju ciljevi. Strateški plan se bavi dugoročnim kritičnim pitanjima sa kojima se organizacija suočava, posebno pitanjima povezanim sa spoljnim uticajima.

Taktičko planiranje se fokusira na implementaciju i postavljanje očekivanih rezultata. Taktičko planiranje je vrsta planiranja koja uključuje „razbijanje“ dugoročnog strateškog plana na manje i jasnije planove koji su kraćeg roka od strateških. Ovim planiranjem organizacija jasno definiše šta namerava da postigne, kako i kada će se to dogoditi, koji resursi će se koristiti i koji je lanac odgovornosti.

Operativno planiranje ima najuži obim i najkraći vremenski okvir. Operativni plan identifikuje konkretne rezultate koje treba postići u datom vremenskom periodu (obično godinu dana) i utvrđuje specifične akcije za postizanje ovih rezultata. Posebno je korisno za same izvršioce, jer se njime predviđaju konkretni uslovi i resursi potrebni za sprovođenje plana.

Kako se planiranjem pretpostavljaju buduća stanja sistema, ali i njegovog okruženja, što je sistem složeniji, to su predviđanja teža. U današnjem svetu, u proces planiranja jasno se mora uključiti element neizvesnosti. Jedan od pristupa osmišljenih da pomognu u pripremi na brze promene i neizvesnosti koje one nose jeste planiranje pomoću scenarija. Planiranjem putem scenarija opisuje se moguće ili verovatno stanje u budućnosti. Scenario definiše skup budućih događaja ili okolnosti koje bi na određeni specifičan način uticale na posmatrani sistem. Ovaj pristup planiranju nastoji, ne samo da uključi promene u okruženju, već i da unapred razvije strateške odgovore. Svrha scenarija jeste da se dodatno smanje iznenađenja i da se spremi više različitih odgovora (Bloom i Manefee, 1994).

Formulisanje scenarija ima za cilj da doprinese procesu donošenja odluka, opisujući određeni energetski sistem ili sektor u određenom kontekstu. Da bi se to obezbedilo, pristupa se kvantitativnom i kvalitativnom definisanju relacija između delova sistema i projektuje se njihov tok u budućnosti. Ovde je važno istaći da energetsko planiranje ne pretenduje da prognozira buduću energetsku

potražnju ili strukturu potražnje. Energetsko planiranje teži da predstavi solucije koje se mogu odigrati, ako se određeni broj aktivnosti sprovede i/ili ako se npr. određene vrednosti (održivi razvoj, ekološka svest, klimatske promene) šire prihvate u populaciji (Sørensen, 2017). Scenariji u tom smislu, mogu predstavljati kompleks, celinu, koja se sastoji od referentnih, ali i ekstremnih solucija da bi se analizirale moguće posledice i granični slučajevi.

Energetsko planiranje u ovom smislu treba shvatiti kao analizu mogućih efekata određenih politika u budućnosti. Do sada jedini dostupan odgovor društva i pojedinca na nepoznanice koje nosi budućnost ljudskog društva, ili nekog konkretnog procesa, kao što je energetska tranzicija, jeste planiranje i istraživanje.

U tom smislu, može se reći da energetsko planiranje i generisanje scenarija kroz modele imaju dva glavna cilja (Sørensen, 2017):

- da obezbede smernice i materijal za diskusiju o budućim energetske sistemima i
- da podrži donosiocima odluka u razvoju kratkoročnih i dugoročnih energetske planova.

Dodatna vrednost koju bi energetsko planiranje trebalo da ima je svakako transparentnost, na čemu se u današnje vreme insistira. Argument za ovu praksu leži u činjenici da transparentno energetsko planiranje čini ulazne podatke i rezultate modela čitljivim i jasnijim za sve društvene aktere. Takođe, transparentnost obezbeđuje lakše ažuriranje konkretnog plana i unapređenje metodologije energetske planiranja (Sørensen, 2017).

### 3.1. Planiranje energetske tranzicije

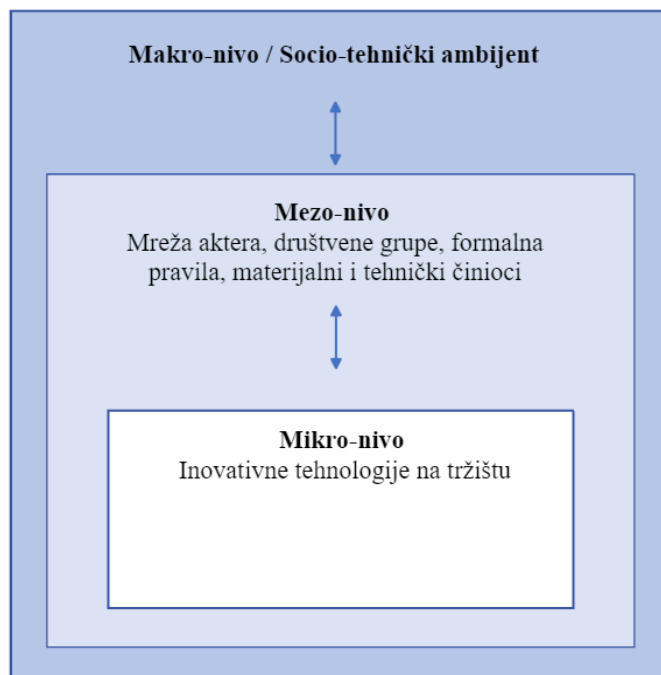
Kao što je istaknuto prethodno, način sprovođenja energetske planiranja najčešće zavisi od svrhe i konteksta u kome se odvija. U tom smislu, ono zahteva da se u obzir uzmu različiti kriterijumi, njihove implikacije i korelacije (Terrados i dr., 2010). Kod planiranja energetske tranzicije, horizont planiranja je dug i generalno je teško sa velikom preciznošću napraviti projekcije budućeg energetske sistema, a posebno npr. sektora domaćinstva, gde je mnoštvo heterogenih potrošača. Kao što primeri energetske tranzicije u grejanju u sektoru domaćinstva u Evropi pokazuju, period tranzicije može biti i preko 30 godina (Sovacool, 2016). Još jedna specifičnost planiranja aktuelne energetske tranzicije jeste potreba da se projektuje prihvatanje inovativnih tehnologija u cilju efikasnijeg korišćenja energije i veće upotrebe OIE, koje najčešće još nisu konkurentne na tržištu.

Od donosilaca odluka i kreatora politike se zahteva da prilikom planiranja energetske tranzicije idu i „preko datih informacija“ (Terrados i dr., 2010). Pred njima je veliki izazov da kroz planiranje zadovolje potrebe sigurnosti snabdevanja, pristupačnosti energije i ekološke prihvatljivosti energije (tzv. energetska trilema tranzicije) (Hansen i dr., 2019).

Jedan teorijski pristup koji se u velikoj meri primenjuje na proučavanje energetske tranzicije, i koji je zaživeo u naučnoj zajednici je tzv. višeslojna perspektiva (*engl.* Multi-layer perspective – MLP) (Hansen i dr., 2019). MLP pristup oblikuje energetske sistem u hijerarhiju na više nivoa, u kojoj politički ambijent (makro-nivo), društvena dinamika i njeni akteri (mezo nivo) i tehnološke inovacije (mikro-nivo) deluju u interakciji. Važnost tehnoloških inovacija i promene u načinu korišćenja energije su jedna od glavnih tema u diskursu aktuelne energetske tranzicije. Da bi se obezbedilo prihvatanje tehnoloških inovacija, neminovno je da dođe do promena socio-tehničkih aspekata energetske sistema koji uključuju veći broj različitih aktera i iziskuju aktivnu ulogu zajednice u celini.

Konceptualizacija energetske sistema prema višeslojnoj perspektivi (MLP) prikazana je na Slici 13. Kako tri nivoa međusobno deluju i utiču jedan na drugi, energetske sistem se shvata kao celina ova tri nivoa. Povoljan razvoj događaja na sva tri nivoa vodi ka tranziciji, odnosno strukturnim promenama u načinu na koji elementi međusobno deluju. Izostanak razvoja pozitivnih događaja na samo jednom od navedenih nivoa neće rezultirati sprovođenjem plana energetske tranzicije u

određenom energetskom sistemu ili pojedinačnom sektoru i samim tim, neće se uspešno odgovoriti na energetske trilemu.



Slika 13. Višeslojna perspektiva u planiranju energetske tranzicije (Hansen i dr., 2019).

### 3.2. Modeliranje za podršku energetskom planiranju

Za podršku procesu planiranja modeli su dokazano našli svoju široku primenu u različitim sferama društva, posebno u delu projekcija budućih tokova i trendova na osnovu predefinisanih zakonitosti i polaznih pretpostavki. Model teži da stvarni, spoljni svet prikaže što realističnije je moguće, u odnosu na dostupne resurse za razvoj modela. Naravno, model ne treba da teži potpunom preslikavanju spoljnog sveta, jer onda se i gubi smisao postojanja samog modela, već je jednostavnije pojavu posmatrati i izučavati uživo. Dakle, svaki model bi, teorijski gledano, trebalo da pojednostavljeno prikaže neku realnu pojavu ili proces, na takav način da jasno identifikuje varijable koje su od najvećeg uticaja i da obezbedi uslove za njihovu detaljnu analizu i utvrđivanje uzročno-posledičnih odnosa.

Modeli namenjeni za podršku energetskom planiranju nisu imuni na neizvesnosti, naprotiv, oni neminovno nose i neizvesnosti svojstvene svakom procesu planiranja. Iz tog razloga, važnije pitanje kod razvoja i primene modela jeste izbor metodologije koja će u konkretnom slučaju proizvoditi nova znanja i smanjiti postojeće neizvesnosti stvarnog procesa ili pojave. Kao što je istaknuto, ne postoji jedna optimalna metodologija za modeliranje energetske tranzicije. Metodologija koja je prihvatljiva za modeliranje i simulaciju jednog aspekta energetske tranzicije, ne mora nužno biti prihvatljiva i za druga pitanja koja se postavljaju pred proces tranzicije narednih 20 ili 30 godina, a kamoli za druge paralelne procese u društvu.

Modeli za podršku dugoročnom energetskom planiranju podrazumevaju, uslovno rečeno, neočekivane i očekivane neizvesnosti (Yazdanie i Orehounig, 2021). Kada su u pitanju neočekivane neizvesnosti, one se najpre odnose na neizvesnosti koje proizilaze iz nedostajućih podataka u modelu, odnosno odsustva vrednosti za promenljivu veličinu za koju se naknadno utvrdi da je od interesa u modelu. Kompjuterski modeli su kodirana i uprošćena reprezentacija stvarnih procesa koji su u fokusu istraživanja. Oni pomoću razvijene ili već postojeće funkcije obrađuju predviđene ulazne

podatke i kao izlaz vraćaju rezultate zbog kojih su razvijeni. Ako određena kategorija podataka nedostaje na početku modeliranja, zadata unutrašnja varijabilnost sistema, odnosno granice sistema, ne mogu se povećati sa ponavljanjem eksperimenta. Ovakve neizvesnosti mogu se smanjiti samo kontinuiranim usavršavanjem i ažuriranjem modela kroz vreme.

Očekivane neizvesnosti, nasuprot neočekivanim, ogledaju se manjkavosti rezultata koja proizilazi iz nesigurnosti u tačnost podataka, niza aproksimacija u simulaciji i slično. Ovakve neizvesnosti su neminovne, ali i jednostavnije za kontrolisanje, jer kreatori energetske modele u tumačenju rezultata mogu da ukažu na proistekla ograničenja i koje su posledice istih. U procesu modeliranja i simulacije vrši se združivanje većeg broja dobijenih podataka iz istraživanja u cilju kreiranja novih informacija, što uzrokuje i nove varijacije i nesigurnosti u izvedenim zaključcima. Te varijacije ne zavise samo od veličine izvornog uzorka, već i od stepena u kome je model odgovorio na glavni izazov koji se postavlja pred svaki model, a to je „realan prikaz stvarnog sveta“. Osim ovih neizvesnosti, očekivane neizvesnosti se takođe ogledaju i u odstupanjima u pretpostavkama autora modela, donosilaca odluka, eksperata ili zainteresovanih strana o trendovima određenih procesa i pojava u budućnosti. Na primer, odstupanja u prognoziranom cenama energenata, tehnološkom razvoju, demografskim kretanjima, vrednosnom sistemu potrošača i sl. spadaju u ove neizvesnosti.

U kontekstu planiranja energetske tranzicije, višeslojna perspektiva energetske tranzicije može se ispitivati korišćenjem različitih metoda i modela za podršku. Mogu se, na primer, zamisliti pojedinačna domaćinstva kako međusobno utiču na mišljenje ili stavove o određenoj tehnologiji ili, nasuprot tome, državne vlasti ili privredni subjekti koji donose odluke o ulaganjima u zavisnosti od prethodnih učinaka i vizija budućnosti. U zavisnosti od pristupa planiranju, razrada modela se može kretati od individualnog potrošača, domaćinstava, njihove društvene mreže i raznih vrsta tehnologija i tržišta proizvoda ili se, sa druge strane, može se poći od formulisanja opštih ciljeva na nivou sistema, tj. sa vrha, pa dalje razrađivati model po segmentima.

Savremena nauka i stručna praksa koriste široku paletu modela za donošenje odluka i za podršku u planiranju. Veliki napredak u hardverskom i softverskom razvoju uzdigao je domen primenljivosti i obim složenosti za rešavanje problema, od jednostavnih aritmetičkih proračuna, do stvaranja složenih simulacija koje rešavaju veliki broj složenih jednačina u realnom vremenu (Bazghandi, 2012).

Pored usložnjavanja modela, menjaju se i njihove karakteristike (Lopion i dr., 2018). Na primer, razvoj je postao transparentniji. Većina novih energetske modele je otvorenog koda ili barem otvorenog pristupa. Ovo omogućava razmenu znanja i razvoj saradnje. U budućnosti, ovo bi moglo pomoći uvođenju standarda u energetske modeliranje i razvoj jake teorijske osnove što bi posledično dovelo do generisanja snažnijih i lakše uporedivih rezultata (Lopion i dr., 2018).

Današnja praksa potvrđuje da su modeli različitog metodološkog okvira i nivoa složenosti postali neizostavni deo podrške u procesu energetske planiranja i racionalnom donošenju odluka (Herbst i dr., 2012). Proces modeliranja se pokreće nakon što određeni subjekat identifikuje problem i utvrdi da bi rezultati modela mogli da daju korisne ulazne podatke za donošenje odluka. Prilikom definisanja modela postavljaju se granični uslovi i definišu atributi sistema koji će se modelirati, analizira se koji su procesi važni, kako se ovi procesi matematički predstavljaju, kao i koje se metode koriste (NRC, 2007).

Uopšteno govoreći, modeliranje se može definisati kao svrshodno, matematičko pojednostavljivanje stvarnosti, tj. prikazivanje stvarnosti sa manje detalja i manje kompleksnosti (Gilbert i Troitzsch, 2005). Ovako definisano, modeliranje ostavlja širi prostor za tumačenje, pa se tako pod modeliranjem podrazumeva (Hamilton i dr., 2022):

- metodologija za obradu i sistematizaciju informacija, podataka, znanja i pretpostavki za određenu svrhu;
- proces učenja, gde modeli razmatraju i testiraju različite hipoteze o tome kako sistem funkcioniše;

- metodologija koja služi za interakciju zainteresovanih strana kako bi se olakšala razmena znanja.

Modeli se mogu klasifikovati na različite načine, na primer, na osnovu njihove konceptualne osnove i matematičkog rešenja, namene za koje su razvijeni i za koje se primenjuju, domen ili disciplinu na koje se odnose, kao i na nivo rezolucije i kompleksnost na kojima rade.

Nevezano od oblasti primene, definisanje, razvoj i primene modela za potrebe odlučivanja pri rešavanju konkretnog problema karakteriše generalna procedura i opšta logika koja je predstavljena u Tabeli 1.

Tabela 1. Osnovni koraci u procesu modeliranja (EPA, 2009)

Koraci		Pitanja modeliranja
<b>Identifikacija i specifikacija problema:</b> utvrditi pravu odluku, relevantna pitanja i uspostaviti ciljeve modeliranja	Definicija svrhe modela	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cilj</li> <li>– Odluke koje treba podržati</li> <li>– Potreba predikcije</li> </ul>
	Specifikacija konteksta modeliranja	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Obim (prostorni i vremenski)</li> <li>– Domen primene</li> <li>– Zajednica korisnika</li> <li>– Potrebni ulazi</li> <li>– Željeni izlazi</li> </ul>
<b>Razvoj modela:</b> razvoj konceptualnog modela koji odražava osnove nauke o procesima koji se modeliraju, razvoj matematičkog predstavljanja problema i kodiranje ovih matematičkih izraza u kompjuterski program	Formulacija konceptualnog modela	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pretpostavke (dinamički, statički, stohastički, deterministički)</li> <li>– Predstavljanje promenljivih</li> <li>– Nivo neophodnih detalja procesa</li> <li>– Naučne osnove</li> </ul>
	Razvoj kompjuterskog modela	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Algoritmi</li> <li>– Matematičke/informatičke metode</li> <li>– Ulazni podaci</li> <li>– Hardverska platforma i softverska infrastruktura</li> <li>– Korisnički interfejs</li> <li>– Kalibracija / određivanje parametara</li> <li>– Dokumentovanje</li> </ul>
<b>Evalvacija modela:</b> testiranje da li su matematički izrazi u modelu programirani pravilno i testiranje rezultata modela poređenjem sa empirijskim podacima	Testiranje modela i revizija	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Teorijska potkrepljenost</li> <li>– Verifikacija</li> <li>– Analiza osetljivosti</li> <li>– Analiza neizvesnosti</li> <li>– Određivanje robusnosti</li> </ul>
<b>Primena modela:</b> izvršavanje modela i analiza rezultata za donošenje odluka	Korišćenje modela	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Analiza scenarija</li> <li>– Ocena predikcije</li> <li>– Analiza politike i vrednovanje</li> <li>– Naknadna revizija modela</li> </ul>

Identifikacija i specifikacija problema je prvi korak u rešavanju problema, bez obzira da li je u pitanju metoda modeliranja ili neka druga metoda za podršku planiranju i odlučivanju. Pre preduzimanja bilo kakvih aktivnosti, neophodno je prepoznati da problem postoji. Nakon toga, potrebno je problem precizno definisati, što se postiže pretragama relevantnih informacija za definisanje okvira problema, prirode problema, okolnosti (Rott i dr., 2021).

Prvi korak u razvoju modela jeste definisanje cilja istraživanja. Cilj istraživanja određuje na koja pitanja model treba da odgovori, tj. koja je svrha modela (Jakeman i dr., 2006). Svrha modela može biti motiv da obezbedi bolje razumevanje posmatranog sistema, prikupljanje novih informacija, testiranje hipoteza, predviđanje, sažeto prikazivanje podataka, formulisanje kontrolnog sistema i sl. Naravno, ovi motivi se ne isključuju međusobno, već mogu postojati paralelno, na različitom nivou važnosti (Jakeman i dr., 2006).

Naredni korak jeste da se utvrdi prostorni i vremenski obim modela, ali i nivo detalja koji je potreban. Prilikom izbora tipa modela, u obzir se uzima i tzv. domen modela, odnosno skup uslova pod kojima je naučno opravdana primena izabranog modela. Naredni koraci u razvoju modela jesu razvoj konceptualnog modela, odnosno postavljanje modela u kontekst postojeće teorije i prakse i opis ponašanja modela, kao i razvoj kompjuterskog modela, koji podrazumeva dokumentovanje algoritma, jednačina, ulaznih podataka i dr.

Premda su modeli pre svega oruđe za aproksimaciju stvarnosti, neizostavno je oceniti kvalitet samog modela, odnosno izvršiti evaluaciju. Evaluacija treba da odgovori u kojoj meri je predloženi model približan realnom modelu, odnosno da istakne koja su ograničenja modela. Na ovaj način postiže se određeni stepen sigurnosti u model, kao podršku za donošenje odluka.

Kada je model razvijen i ocenjen, pristupa se njegovoj primeni od strane donosilaca odluka. Korišćenje modela za podršku odlučivanju zahteva da primena modela bude transparentna i javno dostupna. Ovo podrazumeva i dokumentovanje svih relevantnih koraka u primeni modela. Ovim se obezbeđuju uslovi za naknadnu reviziju i unapređenje modela u cilju kontinuiranog poboljšanja modela i usklađivanja sa novim naučnim i stručnim dostignućima.

Kada su u pitanju energetske modeli, oni se koriste za projekcije buduće energetske potražnje, snabdevanja, strukture potrošnje određenog sistema, sektora, na nacionalnom, regionalnom ili lokalnom nivou (Herbst i dr., 2012). Uglavnom se koriste u eksplorativne svrhe, odnosno u početnim fazama definisanja energetske politike (Süsser i dr., 2021) i uz pomoć informacionih tehnologija. Kako eksperimenti nekada nisu odgovarajuća metoda za istraživanje određenih prirodnih, društvenih ili tehničkih procesa, računarsko modeliranje se može postaviti u funkciju istraživanja realnog energetskeg sistema (Tovar-Facio i dr., 2021).

Modeli za podršku energetske planiranju predstavljaju sredstvo podrške za multi-kriterijumsku procenu uticaja energetske politike na društvo, ekonomiju, tehničko-tehnološki razvoj i životnu sredinu (Debnath i Mourshed, 2018). Modeliranje energetske tranzicije pospešuje proces kreiranja energetske politike, obezbeđujući uvid u efekte političkih instrumenata i mera. Takođe, modeliranje pomoću scenarija omogućava testiranje efekata različitih alternativa, odnosno politika. Za vremenski horizont modela pogodne su dve opcije, ili istraživanje ciljne godine u budućnosti, ili transformacija do ciljne godine.

Modeli energetskeg sistema se obično klasifikuju na modeliranje odozgo na dole (*engl.* top-down), čiji je fokus na povezivanje energetskeg sistema sa drugim makroekonomskim sektorima, i odozdo na gore (*engl.* bottom-up), koji poklanjaju pažnju socio-tehnološkim detaljima sistema (Prina i dr., 2020). Takođe, postoje i tzv. hibridi, koji imaju karakteristike i jednog i drugog tipa modeliranja. Važno je napomenuti da ne postoji „bolji“ način od navedena dva (ili trećeg, njihove kombinacije) za modeliranje energetskeg sistema u cilju planiranja. Pristup koji se koristi zavisi pre svega od cilja koji se postavlja pred model. U nastavku su elaborirane glavne karakteristike dva navedena pristupa,



njihove prednosti primene u odnosu na cilj, ali i osnovni nedostaci koje treba imati u vidu prilikom tumačenja rezultata modela.

### 3.2.1. Modeliranje pristupom „odozgo na dole“

Modeliranje „odozgo na dole“, odnosno „top-down“ modeliranje, jeste pristup u kome razvoj modela počinje od sistema kao celine. Kompletan sistem se zatim deli na manje pod-sisteme sa više detalja. Svaki deo ponovo prolazi kroz pristup odozgo na dole dok se kompletan sistem ne dizajnira sa svim potrebnim detaljima. Pristup „odozgo na dole“ se takođe karakteriše razbijanjem većeg problema na manje probleme i njihovo pojedinačno rešavanje.

Ovi modeli daju agregatni pogled na energetske sektore i privredu kada simuliraju ekonomski razvoj, potražnju za energijom i snabdevanje energijom. Trenutno se makroekonomski energetske modeli često koriste za procenu ekonomskih troškova, ekoloških efekata i opštih instrumenata energetske ili klimatske politike, kao što su šeme trgovanja emisijama (*engl.* Emission Trading System - ETS), ili podsticajne mere za korišćenje OIE i dr.

Ovaj pristup pretpostavlja makroekonomsku perspektivu. Troškovi i benefiti određenih politika su definisani u smislu gubitaka ili rasta u proizvodnji, finansijskoj uštedi ili bruto domaćem proizvodu (BDP). Ovi modeli se fokusiraju na povezivanje energetskog sistema sa drugim makroekonomskim sektorima. Obično ih karakteriše pojednostavljen prikaz komponenti i složenosti energetskog sistema i stoga nisu prikladni za identifikaciju politika specifičnih za određeni sektor. Njihovo polje primene je procena uticaja energetskih i klimatskih politika na društveno-ekonomske sektore kao što su ekonomski rast, javno blagostanje, zapošljavanje itd. (Herbst i dr., 2012).

Jedna od glavnih prednosti energetskih modela „odozgo na dole“ je doslednost procena ekonomskih i društvenih efekata što olakšava sveobuhvatno razumevanje uticaja energetske politike na ekonomiju, bezbednost i životnu sredinu zemlje ili regiona. S druge strane, modeli odozgo nadole pate od nedostatka tehnoloških detalja i daju prilično generalizovane informacije. Shodno tome, možda neće biti u stanju da npr. daju odgovarajuću indikaciju tehnološkog napretka, pošto ne modeliraju direktno tehnološke promene, nemonetarne prepreke energetskej efikasnosti ili specifične politike za određene tehnologije ili grane. Naročito na duge staze, ovo može biti nedostatak, jer u dužim vremenskim intervalima se mogu očekivati značajne tehnološke promene, neekonomske barijere i strukturne promene, kao i promene u ponašanju i stavovima potrošača, koje bi bilo poželjno da su uključene u modele za podršku dugoročnom modeliranju.

### 3.2.2. Modeliranje pristupom „odozdo na gore“

Model „odozdo na gore“, odnosno „bottom-up“, jeste pristup dizajnu sistema gde su osnovni delovi sistema detaljno definisani. Kada su ovi delovi dizajnirani i razvijeni, onda se ovi delovi ili komponente povezuju zajedno da bi formirali veću celinu. Ovaj pristup se ponavlja dok se ne izgradi kompletan sistem. Prednost modela „odozdo na gore“ je u donošenju odluka na veoma niskom nivou i odlučivanju koje teži da oponaša odlučivanje u realnom svetu. Što se tiče matematičke forme, energetske modeli „odozdo na gore“ su razvijeni u obliku simulacionih ili optimizacionih modela, a u novije vreme i modela zasnovanih na agentima.

Ovi detaljni modeli sa ekonomskog i socio-tehnološkog stanovišta omogućuju korisniku da uporedi uticaj različitih tehnologija na energetske sistem i da proceni najbolje alternative za npr. niže emisije gasova staklene bašte, za efikasnije korišćenje energije ili za postizanje nekih drugih energetskih ciljeva. Međutim, pristup „odozdo na gore“ ne uzima u obzir veze između energetskog sistema i makroekonomskih sektora, čime se zanemaruju spoljni uticaji na posmatrani energetske sistem.

Glavna karakteristika ovih modela je njihov relativno visok stepen tehničko-tehnoloških detalja (u poređenju sa energetskim modelima „odozgo na dole“) koji se koristi za procenu buduće potražnje i ponude za energijom. Modeli „odozdo na gore“ takođe mogu dati detaljne ocene politika specifičnih za sektor ili tehnologiju.

Međutim, ovaj visok stepen detaljnosti znači da ovi modeli u velikoj meri zavise od dostupnosti podataka, kao i od kredibiliteta u pogledu njihovih brojnih pretpostavki o distribuciji tehnologije, investicijama i operativnim troškovima. Postoje i kritike modeliranja „odozdo na gore“ koje se tiču nedostatka makro-efekta pretpostavljene tehnološke promene na ukupnu ekonomsku aktivnost, zaposlenost i cene (Prina i dr., 2020).

### 3.3. Karakteristični pristupi u modeliranju energetske tranzicije

Kada je u pitanju modeliranje energetske tranzicije, danas se u literaturi mogu sresti i „top-down“ i „bottom-up“ pristupi, ili njihova kombinacija, u zavisnosti od konkretnog predmeta istraživanja i razrade problematike kojom se konkretni modeli bave. Kako energetske tranzicije odlikuje višeslojnost u planiranju, i kako su uključeni različiti socio-tehnički aspekti u prihvatanju tehničkih inovacija i transformacije postojećeg sistema, i kako je za energetske tranzicije potreban duži vremenski interval, modeli energetske tranzicije trebali bi da zadovolje određeni skup uslova, od kojih su neke opšti, a neki specifični (Adepetu, 2016):

- Mogućnost modeliranja fizičkih komponenti, kao što su npr. tehnički entiteti u sistemu, poput fotonaponskih sistema, električnih automobila, kućnih aparata i dr.;
- Mogućnost modeliranja socioloških komponenti, pod kojima se pre svega misli na aktere unutar posmatranog sistema, kao npr. potrošači i proizvođači električne energije, distributeri, domaćinstva i dr.;
- Mogućnost modeliranja socio-tehničkih interakcija između aktera i tehničkih entiteta u sistemu, koje bi trebalo da se ogleda kroz usvajanje i korišćenje određenih tehnologija;
- Softverska podrška za modeliranje u cilju razvoja kompleksnijih modela;
- Mogućnost ocene praktičnih politika kroz model;
- Sposobnost modela da jasno artikulise uzroke i posledice;
- Mogućnost unosa empirijskih podataka, u cilju smanjenja pretpostavki i aproksimacija;
- Sposobnost modela da izvrši agregaciju interakcija na mikro nivou u obrasce na nivou sistema;
- Sposobnost evolucije, koja podrazumeva da je model u stanju da prati promene i razvoj komponenti sistema tokom vremena;
- Mogućnost proširivanja modela, odnosno posedovanje svojstva skalabilnosti.

U literaturi se sreće više različitih pristupa u modeliranju navedenih specifičnosti energetske tranzicije i njihov broj je danas generalno u porastu. Neki od karakterističnih pristupa koji pokušavaju da odgovore na navedene specifičnosti su (Adepetu, 2016):

- Modeli sistemske dinamike,
- Simulacije diskretnih događaja,
- Modeli opšte ravnoteže,
- Ekonometrijski modeli,
- Modeli zasnovani na agentima.

Modeli sistemske dinamike (SD) podrazumevaju dekompoziciju sistema na različite komponente sistema, odnosno podsisteme, i pronalaženje zavisnosti između ovih komponenti. Ove zavisnosti su predstavljene funkcionalnim vezama koje definišu ponašanje sistema. SD modeli se mogu fokusirati na makro ili mikro nivo. Međutim, preveliko pojednostavljivanje SD modela može dovesti do izostavljanja ključne sistemske dinamike, koja je važan aspekt energetske tranzicije. Kao i u drugim pristupima modeliranju, mora se postići ravnoteža jednostavnosti i sveobuhvatnosti (Zlatanović, 2010).

Simulacija diskretnih događaja (*engl.* Discrete Event Simulation - DES) uključuje modeliranje promena unutar sistema putem diskretnog skupa događaja. U svom osnovnom obliku, DES model ciklično prolazi niz događaja kroz niz procesa, koji zauzvrat određuju stanje sistema kao celine.

Primarna prednost DES-a je njegova sposobnost da predstavi entitete – događaje, aktivnosti i procese sa različitim atributima, čime se hvata dinamika na mikro nivou. Međutim, ovi entiteti su pasivni jer nema aktivnog donošenja odluka i kao rezultat toga, društvene interakcije i pojavna ponašanja u sistemu ne mogu se lako posmatrati. U početku, DES je razvijen i korišćen u modeliranju proizvodnih procesa, ali je vremenom našao svoju primenu i u drugim sferama privrede i društva u celini (Jovanovski i dr., 2012).

Modeli opšte ravnoteže (*engl.* Computable General Equilibrium modelling – CGE) modeluje sisteme iz makroekonomske perspektive, fokusirajući se na ponudu, potražnju, tržišne cene itd. Izvorno su korišćeni kao modeli za opisivanje alokacije resursa u privredi, kao rezultat interakcije ponude i potražnje, što u krajnjem ishodi dovodi do ravnotežne cene. Ovi modeli pružaju određenu sposobnost objašnjenja uzročnosti između politika i ishoda simulacije. U ovim modelima, sistem je modeliran tako da postigne ravnotežu u svakom vremenskom koraku. Modeli opšte ravnoteže koriste makroekonomske jednačine, stoga se pristup može okarakterisati kao „odozgo na dole“ sa agregatnim varijablama i usrednjavanjem heterogenosti u sistem (Adepetu, 2016).

Ekonometrijski modeli proučavaju korelacije u dinamičkom sistemu povezujući matematičku ekonomiju i metode statističke analize kroz razvijanje modela za kvantitativnu analizu. Ovi modeli se obično zasnivaju na ekonomskim teorijama koje pretpostavljaju optimizaciju ponašanja ekonomskih subjekata (Adepetu, 2016). Pomoću ekonometrijskih modela razmatraju se različite politike i sprovodi se analiza „šta-ako“ svake intervencije, što dovodi do različitih budućih stanja sistema. Ovaj pristup, međutim, ne modelira direktno dinamiku sistema koji se proučava, odnosno osnovne procese koji dovode do evolucije sistema.

Modeliranje zasnovano na agentima (ABM) predstavlja modele apstrakcije sistema kroz agente i njihovo okruženje. Agent u ABM-u može predstavljati pojedinca, grupu ljudi ili organizaciju, u zavisnosti od perspektive modelara. ABM modeli koriste pristup „odozdo na gore“, gde je fokus na dinamici sistema na mikro nivou koja se agregira da bi se dobila dinamika sistema na makro nivou. Za razliku od modela koji imaju sličan pristup, entiteti na mikro nivou u ABM-u su aktivni. Na primer, u ABM-u koji simulira usvajanje fotonaponskog sistema, agent može odlučiti da donese autonomnu odluku u bilo kom trenutku tokom simulacije da kupi određeni uređaj na osnovu svojih preferencija, uticaja drugih agenata i varijabli okruženja. ABM modeli zahtevaju viši nivo složenosti kod dizajniranja koje je potrebno za predstavljanje agenata unutar sistema (Adepetu, 2016). Iako se pitanja dizajna i evaluacije politika mogu postaviti kao *ex ante* pitanja (pre same implementacije), ili kao *ex post* pitanja (retroaktivno), većina današnjih ABM modela se fokusira na probleme kreiranja politike u *ex ante* okruženju (Rai i Henry, 2016).

Sumirajući uslove koje bi trebali da zadovolje modeli energetske tranzicije i osnovne karakteristike često korišćenih pristupa u modeliranju, uočava se da se kod modeliranja procesa energetske tranzicije zahteva da se posebna pažnja usmeri na potrošača, kao krajnjeg korisnika. Na primer, kod planiranja dinamike i obima energetske tranzicije na nivou domaćinstava, kod pitanja kao što su zamena postojećih sistema grejanja za modernije, ugradnja fotonaponskih panela, kupovina električnih automobila i sl., zahtevaju se složeniji modeli, nego što su modeli koji se oslanjaju striktno na istorijske trendove ili ekspertske procene, da bi se dobili precizniji rezultati za podršku energetskom planiranju.

Prvi razlog za složenijim modelima leži u činjenici što su predmet modeliranja decentralizovani sistemi i entiteti, heterogeni po osobinama, potrebama, finansijskim mogućnostima i drugim, više ili manje objektivnim činiocima. U takvim okolnostima teško je izvući zakonitosti o budućim događajima na osnovu prošlosti, već je potrebno obezbediti model koji će uključiti proces odlučivanja na individualnom nivou, koji će biti dinamičan i multikriterijumski orijentisan. Drugi razlog leži u težnji da se preciznije procene efekti političkih instrumenata na tok energetske tranzicije. Ono što je dovoljan podsticaj za jednu kategoriju domaćinstava, za drugu ne mora biti, ili ono što je prepreka

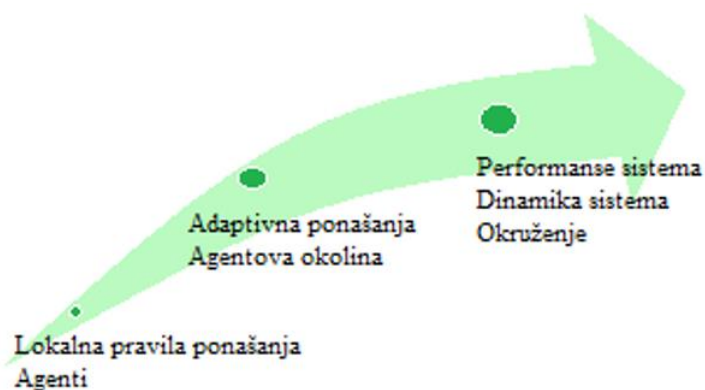
kod jednih, kod drugih može biti podsticajni faktor (Rai i Henry, 2016). Analizirajući individualne reakcije potrošača i evoluciju u ponašaju kroz vreme i kroz interakcije sa drugim potrošačima, može se sa većom sigurnošću oceniti efekat konkretnih političkih instrumenata.

Imajući u vidu navedene specifičnosti modeliranje energetske tranzicije i imajući u vidu heterogenost domaćinstava, kao autonomnih i fragmentiranih entiteta u energetsom sistemu, za projekciju energetske tranzicije u domaćinstvima i procenu efekata političkih instrumenata za ubrzanje energetske tranzicije u *ex ante* okruženju, može se zaključiti da se modeliranje zasnovano na agentima (ABM) ističe kao najadekvatnija metoda da odgovori kompleksnosti predmeta istraživanja u disertaciji.

#### 4. MODELIRANJE ZASNOVANO NA AGENTIMA

Model i simulacija zasnovani na agentima (ABM) predstavljaju jedan od novijih pristupa u simulacionom modelovanju kompleksnih sistema. Pristup je bazično zasnovan na autonomnim agentima i njihovim međusobnim interakcijama (Čavoški, 2016). Simulacija zasnovana na agentima vodi poreklo iz tzv. multi-agentnih sistema (*engl.* Multi-agent systems), robotike i veštačke inteligencije. Danas se ovi modeli sve više primenjuju, kako u naučno-istraživačkim projektima, tako i u komercijalnim simulacionim modelima. Razlog za sve veću upotrebu ovih modela, pre svega, leži u sve većoj povezanosti posmatranih društvenih i prirodnih fenomena i procesa, ali i u mogućnosti današnjih računara da procesiraju ovakve modele.

Računarsko modeliranje zasnovano na agentima je metoda u modeliranju složene društvene dinamike koja je svoju primenu našla u ispitivanju različitih društvenih, tehničkih i prirodnih fenomena u poslednjih nekoliko decenija. U ABM-u, agenti su predstavljeni kao autonomni entiteti u programiranom sistemu. U okviru sistema koji se razmatra postavljaju se pravila koja regulišu njihovo ponašanje, definiše se početna konfiguracija sistema i uvode se pretpostavke o ponašanju, prilagođavanju i interakciji agenata međusobno i sa okruženjem tokom vremena. ABM na taj način omogućava simulaciju ponašanja individualnih entiteta pomoću koje se mogu pratiti obrasci, dinamika, ili krajni ishodi na nivou populacije. Zasnivajući se na jednostavnim pravilima ponašanja i interakcijama agenata, prirodni sistemi ispoljavaju tzv. kolektivnu inteligenciju, čak i bez postojanja ili dirigovanja od strane jednog autoriteta na višem hijerarhijskom nivou (Slika 14).



Slika 14. Pristup „odozdo na gore“ u ABM modelima u procesu modelovanja realnih sistema (Čavoški, 2016)

Razlog za sve češću primenu ABM modeliranja leži pre svega u činjenici da oni jednostavno opisuju fenomene koji u realnom svetu postaju sve kompleksniji. Glavna pretpostavka se ogleda u tome da se ljudi i njihove socijalne interakcije mogu verodostojno modelovati, ako ne u potpunosti, onda na razumnom nivou apstrakcije (Čavoški, 2016). ABM kao metoda modeliranja pruža mogućnost da se direktno analizira sam proces donošenja odluka pojedinaca, npr. u pogledu uvođenja inovacija u način grejanja i praćenje efekata tog ponašanja. Ova metoda omogućava da svaki agent deluje na osnovu svojih vlastitih pravila, u zavisnosti od trenutne situacije u njegovom okruženju.

Ulazni podaci o modelovanom sistemu mogu se zasnivati na različitim bazama podataka, pretpostavkama i teorijama, a rezultati na nivou pojedinca i na nivou populacije mogu se statistički obrađivati. ABM omogućava autonomiju u definisanju granica sistema i pretpostavki, a agenti se mogu modelirati na bilo kom nivou složenosti.

Kao komparativna prednost ABM metode najčešće se ističe fleksibilnost (Chappin i dr., 2020). Ova prednost pomaže kreatorima modela i korisnicima da upravljaju sa tri posebna izazova koja kompleksni sistemi postavljaju pred istraživanje (Hammond, 2015):

- heterogenost,
- prostorna struktura,
- prilagođavanje.

Uzimanje u obzir heterogenosti može biti od velikog značaja kod istraživanja određenih pojava koje imaju izraženo „bogatstvo različitosti“. Složene sisteme u stvarnom svetu često karakteriše heterogenost među individualnim entitetima (agentima). Tipovi agenata mogu se značajno razlikovati po skupovima informacija, ciljevima, strukturi podsticaja, ograničenjima itd. Eksplicitnim modeliranjem svakog pojedinačnog agenta, ABM omogućava veoma sadržajno i fleksibilno predstavljanje heterogenosti.

Važna prednost ABM-a je i mogućnost uključivanja strukturno bogatih, dinamičnih i detaljnih struktura društvenih mreža. Direktnim ugrađivanjem sofisticiranih prostornih elemenata, ABM može efikasno da modelira dinamiku koja je rezultat izloženosti u prostoru i vremenu, kontakata između pojedinaca, uticaja lokalnog ambijenta na donošenje odluka i geografskih ograničenja (Hammond, 2015).

ABM metoda je posebno korisna u modeliranju prilagođavanja agenata. Modeliranjem na individualnom nivou, ABM dozvoljava razmatranje više međusobno zavisnih činilaca koji utiču na ishod odluke. Pošto su ABM modeli dinamični, prilagođavanje na individualnom nivou takođe može biti posmatrano u simulaciji, bilo da je u obliku biološke adaptacije ili prilagođavanja ponašanja. Dinamičnost na individualnom nivou takođe omogućava da se kroz ABM modele razmotri fenomen kao što je zavisnost krajnjeg ishoda od putanje, što je važno za modele koji se fokusiraju na ključne razvojne momente i ključne pokretače za određene obrasce ponašanja. Obrasci ponašanja na individualnom nivou se akumuliraju u kolektivne obrasce, odnosno društvene procese (Hammond, 2015).

Namena i broj ABM modela iz godine u godinu rastu. Spektar primene je različit i broj novih modela nije jednostavno registrovati. Dosadašnja praksa ipak razlikuje osnovne namene primene ABM modela, odnosno u koje svrhe se kreiraju ABM modeli. Najmanje pet osnovnih namena se može identifikovati (Chappin i dr., 2020):

1. Teorijsko izlaganje – Ukoliko je potrebno određenu teoriju vizualizovati i intuitivno predstaviti, ABM se može koristiti da predstavi tu teoriju i istraži njene posledice.
2. Identifikacija agenata - može se koristiti za formalizovanje određene hipoteze o tome šta je agent, kako agent razmišlja i može se testirati hipoteza tako što će se uočeni obrasci upoređivati sa posmatranom stvarnošću.
3. Objasnjenje – ABM se može koristiti da pruži konzistentan, realističan opis onoga što se dešava u određenoj situaciji, bez obzira da li je opis zasnovan na teorijskim konceptima, posmatranju ili empirijskim podacima.
4. Predviđanje - U situacijama u kojima su pravila ponašanja agenata, interakcije i okruženje poznati, ABM se može koristiti za predviđanje budućih stanja sistema.
5. Istraživanje i otkriće - ABM metod je na kraju pogodan za istraživačke svrhe. Postavljanje pitanja „šta ako“ se svodi na ponavljanje pokretanja modela pod velikim brojem različitih početnih uslova i mapiranje mogućih ishoda.

Osim prednosti koje ABM metoda donosi po sebi, u cilju osiguranja objektivnog tumačenja rezultata primene simulacija u ABM-u, neophodno je biti svestan osnovnih slabosti svakog metodološkog pristupa i naknadno analizirati njihov uticaj na rezultate. Analiza prethodnih publikacija u oblasti ABM-a pokazala je da su postojeći ABM modeli često orijentisani na specifične slučajeve, što otežava poređenje studija modeliranja u literaturi kroz zajedničke kriterijume i teorijske koncepte.

Takođe, ABM simulacije imaju poteškoća u validaciju dobijenih projekcija, pošto modeli ne mogu da reprodukuju istorijske podatke, niti se dobijeni rezultati projekcije mogu testirati u odnosu na podatke iz stvarnog sveta. Dalje, neke karakteristike agenata je teško kvantifikovati, zbog složenosti ljudskog ponašanja i društvenih interakcija.

Uzimanje u obzir prirode društvenih pojava sa previše (poznatih i nepoznatih) kompleksnih činilaca je možda i glavni izazov u simulaciji pomoću ove metode. U stvarnosti je moguće očekivati iracionalno ponašanje pojedinca ili grupe, koje je teško kvantifikovati, kalibrirati, a ponekad i opravdati. Naravno, ovaj problem je više karakteristika društvenih pojava, a ne svojstvo ABM metode same po sebi.

Navedene slabosti ABM simulacionih modela mogu predstavljati glavni izvor problema u tumačenju ishoda simulacija. Zbog različitog stepena tačnosti i potpunosti ulaznih podataka u model, preporuka jeste da se izvede veći broj simulacija i da se uradi aproksimacija izlaznih podataka. I pored toga, rezultate ne treba tumačiti kao apsolutnu istinu, već prihvatiti sa određenim stepenom verovatnoće i u okviru koji je predefinisana kvalitetom ulaznih parametara u model.

#### 4.1. Tipovi simulacija

Simulacija je imitacija dinamike procesa ili sistema u stvarnom svetu tokom vremena. Simulacije kao takve, predstavljaju alternativu direktnim eksperimentima za prikupljanje podataka (Leonelli, 2021). Osim toga, eksperimenti često nisu odgovarajuća metoda za ispitivanje socioloških fenomena, zbog teškoće u ostvarivanju uslova kontrolisanosti pojave. Danas je ustaljena praksa korišćenje računara za kreiranje veštačkog (virtualnog) sistema da bi se izvukli zaključci o karakteristikama i funkcionisanju realnog sistema ili procesa.

Ponašanje sistema se proučava konstruisanjem simulacionog modela, koji obično ima oblik skupa pretpostavki o funkcionisanju sistema. Jednom razvijen, simulacioni model se može koristiti za različite zadatke, kao npr. za istraživanje ponašanja sistema po različitim scenarijima (tzv. analize „šta ako?“), za testiranje promena u sistemu pre implementacije u stvarnom svetu, za praćenje razvoja sistema u toku samog kreiranja i dr. Glavni i najteže ostvarljiv izazov za razvoj simulacije je osiguranje da su svi relevantni činioci sistema uključeni u simulaciju. Kada to nije moguće, važno je da su autori simulacije upoznati sa time i da se ograničenosti na pravi način registruju.

Kao prednosti simulacija, uobičajeno se navodi (Leonelli, 2021):

- Jeftinije su za implementaciju i ne zahtevaju narušavanje realnog sistema;
- Brže su za implementaciju i vremenski period koji se simulira može se komprimovati ili proširiti kako bi se omogućilo ubrzanje ili usporavanje u praćenju sistema koji je predmet istraživanja;
- Mogu se ponavljati neograničen broj puta i rad sistema se može posmatrati iznova;
- Simulacije nisu etički i politički sporne.

Klasifikacija tipova simulacionih modela se može izvršiti na osnovu više različitih kriterijuma (Leonelli, 2021):

- Na osnovu kriterijuma prediktivnosti, simulacije mogu biti stohastičke ili determinističke. Kada u modelu postoje slučajne promenljive, onda su i izlazi iz modela takvi, a kada je set ulaznih podataka kontrolisan i fiksna, izlazi iz modela će biti uniformni.
- Simulacioni modeli koji predstavljaju sistem samo u određenom trenutku nazivaju se statički. Monte Karlo simulacije su najpoznatija vrsta ovog tipa simulacija. Sa druge strane, dinamički simulacioni modeli predstavljaju sisteme kako se razvijaju tokom vremena.
- Simulacije se takođe klasifikuju kao kontinuirane ili diskretne. Kontinuirani simulacioni modeli imaju oblik jednačina sa promenljivima koje odgovaraju realnim vrednostima. Rešavanjem jednačina može se izračunati stanje modela u bilo kojoj tački simulacije. Diskretne simulacije predstavljaju stvarnost modelovanjem stanja sistema i promena njegovog stanja nakon određenog vremenskog intervala ili događaja. Otuda postoje dve vrste diskretnih simulacionih modela - modeli diskretnog vremena i modeli diskretnih događaja. Modeli diskretnog vremena su oni koji dele simulaciju na fiksne vremenske intervale. U svakom intervalu, stanje modela se ažurira korišćenjem funkcija koje opisuju interakcije.

Modeli diskretnih događaja su oni koji održavaju red događaja planiranih da se dogode po vremenskom redu, pri čemu svaki događaj predstavlja promenu stanja elementa u modelu.

Uvažavajući navedenu tipologiju simulacionih modela, ABM simulacioni modeli mogu biti stohastički ili deterministički, u zavisnosti od ulaznih podataka i predmeta simulacije. ABM simulacioni modeli pristupaju modeliranju različitih fenomena tokom vremena, dakle razmatraju ih kao dinamičke sisteme u kojima su agenti u interakciji. Na kraju, ABM simulacioni modeli su tip diskretnih simulacija, jer mogu pratiti signale diskretnih događaja ili vremenskih intervala.

#### 4.2. Pojam agenta i osnovne karakteristike

U smislu ABM modeliranja, agent se može definisati kao entitet u virtuelno konstruisanom sistemu (virtuelnom svetu) koji može uticati na promene u tom sistemu kroz akcije (Tsfatsion, 2022). Agenti mogu predstavljati širok spektar entiteta, na primer, individualne oblike života, društvene grupe, institucije ili fizičke pojave. Agenti se mogu kretati od sofisticiranih entiteta za donošenje odluka (npr. „ljudi“) do fizičkih fenomena bez kognitivne funkcije (npr. „vremenske prilike“).

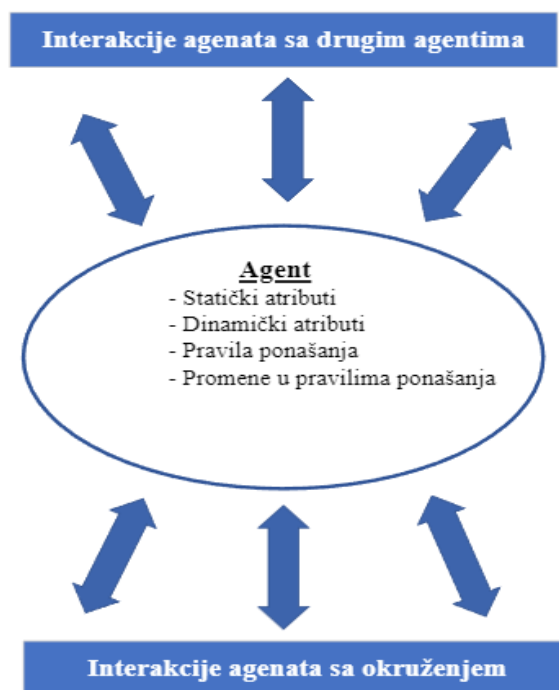
Agenti su entiteti koji su opremljeni atributima i pravilima ponašanja. Složeni međusobni odnosi entiteta se mogu opisati eksplicitnim modeliranjem svojstava i pravila ponašanja, u zavisnosti od interakcija i promenljivog okruženja (Klein, 2020). Agenti imaju definisano „osnovno ponašanje“, kao i „ponašanje višeg nivoa“. Osnovna pravila ponašanja odgovaraju na promene iz okruženja, dok ponašanje višeg nivoa ima osobinu prilagođavanja na promene u sistemu.

Kao tipične karakteristike agenata ističu se sledeće (Čavoški, 2016):

- Agent poseduje skup karakteristika i pravila koja upravljaju njegovim ponašanjem i pružaju mu mogućnost da samostalno donosi odluke.
- Svaki agent ima ugrađene ciljeve koje treba da postigne u skladu sa svojim ponašanjem. Ovo omogućava agentima da uporede efekte svog ponašanja i u skladu sa tim da prilagode svoje ponašanje.
- Agent je nezavisan. Agent može funkcionisati nezavisno od drugih agenata u svom okruženju.
- Agent je adaptivan i poseduje sposobnost da uči i menja svoja ponašanja tokom vremena u skladu sa prethodnim iskustvom.

Iz prethodne podele može se zaključiti da je glavna osobina agenata njihova sposobnost da donose odluke i reaguju na promene u okruženju (Čavoški, 2016). Veoma često u modelima agenti neće imati sve pobrojane karakteristike. To zavisi od svrhe i složenosti sistema koji se ispituje. Pravila ponašanja agenta mogu da budu manje ili više kompleksna, što zavisi od toga sa koliko informacija agent donosi odluku. Kompleksniji modeli mogu uključiti i varijable iz okruženja, uključujući i interakcije između agenata (Slika 15).





Slika 15. Tipičan agent u ABM modelu (Macal, 2018)

### 4.3. Osnovni principi modeliranja zasnovanog na agentima

Izrada simulacionih modela zasnovanih na agentima je veoma slična izradi bilo kog modela, kao što je prikazano u prethodnom poglavlju (Tabela 1). Prvo se identifikuje svrha modela, pitanja na koja model treba da odgovori, ciljevi modeliranja i potencijalni korisnici. Nakon toga sledi analiza sistema koji se ispituje, identifikuju se komponente, potrebni podaci, koncipira se model i na kraju se modelira sistem.

Osim opisanih standardnih koraka, izgradnju simulacionih ABM modela, karakterišu i sledeći principi:

- Identifikacija vrednosti koju donosi primena modela zasnovanog na agentima u odnosu na druge metode;
- Identifikacija agenata, njihovih atributa, i definisanje njihovog ponašanja;
- Identifikacija veza između agenata i definisanje njihovih interakcija;
- Definisanje agentove okoline i uzajamnog dejstva agenata i okoline;
- Odabir softverskih platformi za razvoj simulacionog modela;
- Validaciju ponašanja agenata;
- Pokretanje modela i analiza izlaznih rezultata u cilju povezivanja mikro-ponašanja agenata sa ponašanjem sistema.

### 4.4. Programski jezici i alati za razvoj modela zasnovanih na agentima

Kada je u pitanju računarsko modeliranje, programski jezici i alati predstavljaju okruženje za razvoj ABM modela. ABM modeli se najčešće razvijaju pomoću standardnih softverskih jezika ili specijalizovanih alata koji pružaju okruženje posebno namenjeno za ovu vrstu modelovanja.

Modeliranje simulacionih modela zasnovanih na agentima u namenskim programskim platformama i alatima (NetLogo, Swarm, MASON, Repast i dr.) razvijeno je kako bi pojednostavila izgradnja simulacionih modela zasnovanih na agentima. Prednost platformi specijalizovanih za ovu svrhu je jedinstven konceptualni pristup. Autor modela ima mogućnost da razvija model u posebnom

programskom jeziku, ima obezbeđen grafički interfejs za vizuelizaciju rezultata, a platforma pruža i mogućnosti izvođenja automatizovanih simulacionih eksperimenata. Na raspolaganju su i specijalizovane funkcije, uključujući i mogućnost vremenskog zakazivanja, dostupnost komunikacionih mehanizama, niz opcija vezanih za arhitekturu, funkciju čuvanja i prikazivanja stanja agenata.

Programske platforme i alati se uslovno mogu podeliti u dve kategorije. Alati koji spadaju u prvu kategoriju izgledaju kao klasične softverske platforme. U njih, na primer, spadaju alati kao što su Swarm, Repast i MASON. Drugu kategoriju predstavljaju platforme koje omogućavaju direktnu izgradnju simulacionih modela kroz jedinstvenu paradigmu. NetLogo je predstavnik ove kategorije.

Swarm je dizajniran kao opšti jezik i alat za ABM. Namenjen je širokoj upotrebi u naučnim domenima. Podsticaj za izradu Swarm-a javio se iz oblasti „Artificial Life“ (veštačkog života). „Artificial Life“ predstavlja pristup u izučavanju bioloških sistema koji pokušava da izdvoji mehanizme iz bioloških pojava korišćenjem elaboracije, obrade i generalizacije ovih mehanizama radi identifikovanja dinamičkih osobina bioloških sistema. Swarm obezbeđuje virtuelnu laboratoriju za posmatranje i sprovođenje eksperimenata na modelu. Koncept dizajniranja modela u ovom softveru je poznat ka algoritam „rojeva“ (jata) (FHWA, 2013), pri čemu je roj grupa objekata i raspored akcija koje agenti izvršavaju. Swarm koristi sopstvene strukture podataka i upravljanje memorijom za predstavljanje objekata modela. Swarm u potpunosti implementira koncept „probe“: tj., alata koji omogućavaju korisnicima da nadgledaju i kontrolišu bilo koji objekat simulacije, bez obzira na to koliko je zaštićen, iz grafičkog interfejsa ili unutar koda. Swarm je fleksibilna simulaciona platforma, međutim nije lako početi sa primenom ove platforme. Potrebno je imati dosta znanja i iskustva u programskim jezicima „Objective-C“ i „Java“, kao i dobro poznavanje objektno orijentisanih koncepata programiranja.

Repast je nastao sa prvobitnim ciljem implementacije Swarm-a, ili programa ekvivalentne funkcionalnosti, u programskom jeziku „Java“. Međutim, Repast nije usvojio celu Swarm-ovu filozofiju dizajna i ne primenjuje rojeve. Repast je takođe jasno imao nameru da podrži rad u domenu društvenih nauka i uključuje alate specifične za tu oblast. Ovi pristupi uključuju ugrađeni jednostavan model i interfejse preko kojih se postavke i programsko kodiranje mogu koristiti za početak izgradnje modela (FHWA, 2013). Postoje tri verzije Repasta i to: Repast za programski jezik „Python“, Repast za programski jezik „Javu“ i Repast za „Microsoft.Net framework“. Repast ima ugrađene mehanizme za komunikaciju između agenata koji se mogu prilagođavati u zavisnosti od potreba simulacionog modela. Takođe, ima veliki broj alata za čuvanje i prikazivanje stanja agenata, zatim za integraciju, kako sa komercijalnim, tako i sa besplatnim geografskim informacionim sistemima (Čavoški, 2016).

MASON je dizajniran kao manja i brža alternativa Repast-u, sa jasnim fokusom na računarski zahtevnije modele sa mnogo agenata, koji se izvršavaju tokom mnogih iteracija. Sam dizajn je u velikoj meri vođen ciljevima maksimiziranja brzine izvršavanja i obezbeđivanja potpune ponovljivosti preko hardvera. Sposobnosti odvajanja i ponovnog spajanja grafičkih interfejsa i zaustavljanja simulacije i premeštanja između računara smatraju se prioritetom za duge i zahtevne simulacije. MASON je najmanje zrela od navedenih platformi, sa osnovnim mogućnostima za grafički prikaz (FHWA, 2013). Simulacioni eksperiment se može pokrenuti bez ili sa vizuelnim prikazom ponašanja agenata i izlaznih podataka. Više simulacionih modela mogu se pokretati paralelno u istom procesu. Napisan je u programskom jeziku „Java“, što omogućava pokretanje i rad u različitim operativnim sistemima. Izvršavanje simulacionih modela je ponovljivo (Čavoški, 2016).

NetLogo je dizajniran sa specifičnim tipom modela na umu: mobilni agenti koji deluju istovremeno na mrežnom prostoru sa ponašanjem kojim dominiraju lokalne interakcije tokom vremena (FHWA, 2013). Dok je modele ovog tipa najlakše implementirati u NetLogo softveru, platforma nipošto nije ograničena na njega. NetLogo je daleko najprofesionalnija platforma po svom izgledu i dokumentaciji. NetLogo je zasnovan na programskom jeziku koji je po svojoj sintaksi jednostavniji od Java ili Objektnog C, a animacija ponašanja agenata u grafici za vizualizaciju izlaznih podataka

deo su platforme i direktno su povezani sa izvršnim kodom. Njega pokreće Java virtuelna mašina, pa se na taj način može koristiti na svim operativnim sistemima (Windows, Linux, MAC).

Autor Netlogo programskog jezika, Uri Wilensky (Wilensky, 1999), definisao je četiri glavna elementa u simulacionim modelima u ovom programskom jeziku: kornjače (turtles), zakrpe (patches), veze (links) i posmatrače (observers). Njihove uloge i odnosi najbolje se mogu predstaviti na sledeći način: „Kornjače (turtles) predstavljaju agente koji se kreću u dvodimenzionalnom svetu koji je podeljen u mrežu koju čine zakrpe (patches). Zakrpa (patch) predstavlja kvadratni deo prostora po kome se kreće agent kornjača (turtle). Veze (links) su agenti koji povezuju dva agenta kornjače (turtles). Agenti posmatrači (observers) nadgledaju dešavanja i pojave u dvodimenzionalnom svetu agenata kornjača (turtles) i agenata zakrpa (patches)“ (Čavoški, 2016).

NetLogo platforma, osim jedinstvenog programskog jezika, poseduje dobru dokumentaciju i sa instalacijom NetLogo softvera dobija se i veliki broj modela iz oblasti prirodnih nauka, matematike, fizike, hemije, ekonomskih nauka, društvenih nauka, dinamike sistema itd. Ovi modeli se mogu koristiti u svrhu učenja ili kao osnova za razvoj drugih modela. Prednost ove platforme je brz i lak razvoj simulacionih modela, mogućnost pokretanja velikog broja simulacionih eksperimenata i mogućnost obrade izlaznih podataka u toku izvršavanja eksperimenta. Takođe, izlazni podaci se mogu prikupljati i u obliku tekstualnih fajlova, što daje mogućnost obrade podataka u drugim alatima.

U Tabeli 2 prikazano je kratko poređenje često korišćenih platformi za razvoj ABM simulacija.

Tabela 2. Poređenje platformi za modeliranje ABM modela (Salgado i Gilbert, 2013)

Kriterijum	Swarm	Repast	MASON	NetLogo
<b>Broj korisnika</b>	Mali	Veliki	U porastu	Veliki
<b>Programski jezik</b>	Objective-C Java	Java Python	Java	NetLogo
<b>Brzina</b>	Umereno brzo	Brzo	Veoma brzo	Umereno brzo
<b>Dokumentacija modela</b>	Umerena	Umerena	Umerena	Dobra
<b>Jednostavnost učenja i programiranja</b>	Slaba	Umerena	Umerena	Dobra

#### 4.5. Primena modeliranja zasnovanog na agentima u energetske tranziciji

Primena ABM-a u modeliranju i simulaciji energetske tranzicije postaje sve popularnija. Raznolikost tematskih oblasti primene, s jedne strane, potkrepljuje važnost multidisciplinarnе analize procesa, a sa druge, ističe značaj primene ABM-a u politici i planiranju, o čemu svedoči broj članaka objavljenih poslednjih godina (Hansen i dr., 2019). Posebno vredna oblast primene ABM u domenu energetske tranzicije može biti u analizama politike i kao podrška procesu energetske planiranju (McGookin i dr., 2021). Sve veća primena ABM simulacionih modela u politici i planiranju doprinosi dubljoj analizi mikro nivoa i perspektive individualnog potrošača tokom tranzicionog procesa.

Postoji širok spektar simulacija baziranih na agentima u energetske tranziciji formiranih sa različitim ciljevima. Posebno se ističe prednost modeliranja baziranog na agentima u sektoru domaćinstva za analizu energetske tranzicije ka čistijim energijama, iz razloga što najviše zavisi od strane potrošača, a ne proizvođača, snabdevača ili regulatora (Klein, 2020).

Kao što je prethodno istaknuto, ABM modeliranje, kao metoda, jeste upravo pogodna za istraživanje strukturnih promena. Potencijal ABM-a da unapredi razumevanje energetske tranzicije leži pre svega u omogućavanju da se uzmu u obzir društvene, bihevioralne, ekonomske, tehnološke, tržišne i političke faktore koji utiču na krajnu strukturu potrošnje i sve druge posledice koje iz toga proizilaze. Pitanja koja zanimaju kreatore politike su kako potrošači usvajaju energetske efikasne tehnologije i kako ih ohrabriti (Adepetu, 2016). Ova metoda je jedna od retkih koja omogućava kroz simulaciju praćenje procesa i promena u strukturi sistema uživo (Chapin, 2012).

Jedan od glavnih razloga za izbor ABM-a u odnosu na tradicionalne pristupe modeliranju je njegova sposobnost da ugradi heterogenost i prilagodljivost potrošača energije. U istraživanju energetske tranzicije i definisanju buduće politike, ova prednost se može iskoristiti na različitim poljima, kao npr. za analizu potražnje za energijom, analizu prihvatanja inovativnih tehnologija, kvantifikaciju prepreka, ocenu instrumenata podrške, informisanosti potrošača. Informacije koje proizilaze iz ABM modela su jedinstvene i one autorima modela i zainteresovanim stranama mogu ukazati bolje na domete konkretnih politika.

Glavna karakteristika koja ABM razlikuje od drugih tehnika ili metoda za modeliranje i simulaciju jeste sposobnost da se modelira proces individualnog odlučivanja. Modeli za podršku odlučivanju započinju proces modeliranja, obrađuju podatke i ispostavljaju rezultata bez saznanja o načinu odlučivanja potrošača i korisnika energije. Individualni nivo odlučivanja nije nešto što je često zastupljeno u energetskim modelima na lokalnom, nacionalnom ili regionalnom nivou. Istine radi, za određene aspekte energetske politike, to i nije presudno, ali kod modeliranja energetske tranzicije, sama njena putanja i konačno odredište će najviše zavisiti od odluka pojedinaca. Bitna pogodnost ovakvog modeliranja jeste što ne ograničava korisnika isključivo na ovaj aspekt tranzicije. Rezultate ABM modela lako je moguće uvrstiti u druge metode, kao što je rezultate modeliranja pomoću drugih metoda, moguće uvrstiti u ABM model (Klein, 2020).

Primeri modela zasnovanih na agentima se često pojavljuju u studijama koje ispituju energetske tranzicije i efekte klimatske i ekološke politike pomoću pristupa „odozdo na gore“ u sektoru domaćinstva (Edelenbosch i dr., 2022), (Nava-Guerrero i dr., 2021), (Tian i Chang, 2020), (Bayer i dr., 2017), (Jensen i dr., 2015), (Lee T. i dr., 2014), (Sopha i dr., 2011). Energetska tranzicija ka čistijim energetskim tehnologijama sa većom efikasnošću je posebno praktična za analizu od strane ABM-a jer značajno zavisi od potrošača, a ne samo od proizvođača, dobavljača i regulatora (Rai i Henry, 2016). Simulacija tranzicije u sektoru domaćinstava posebno zahteva višedimenzionalnu perspektivu ABM-a i potencijal za analizu paralelnih promena u ekonomskoj, socijalnoj, tehnološkoj, institucionalnoj i političkoj sferi društva.

Edelenbosch i dr. (2022) su razvili model za simulaciju energetskog ponašanja domaćinstava za podršku dugoročnom planiranju. Struktura modela je zasnovana na heterogenim agentima, a ulazni podaci koji su korišćeni su prikupljeni iz zvanične statistike i uz pomoć anketiranja domaćinstava. Da bi podaci bili reprezentativni na nivou populacije, izvršena je karakterizacija različitih grupa domaćinstava. Istraživanje je sprovedeno u Italiji, Holandiji i Švajcarskoj i obuhvatilo je prikupljanje podataka o socio-demografskim karakteristikama, stavovima, navikama, ulaganjima u efikasnije korišćenje energije i dr. Istraživanje se fokusira na dva glavna pitanja: 1) Može li razvijena metoda da pruži uvid u to zašto domaćinstva različito troše energiju i po čemu se razlikuju u svojim ulaganjima? i 2) Kako njihovo energetske ponašanje utiče na projektovano usvajanje tehnologije u tranziciji u domaćinstvima?

Nava-Guerrero i dr. (2021) su kreirali ABM model u cilju ispitivanja kako grupno donošenje odluka u stambenim zgradama može uticati na energetske tranzicije grejanja u sektoru domaćinstva u Holandiji. Pošto nove zgrade moraju biti u skladu sa standardima energetskih performansi i stoga se grade bez priključaka na prirodni gas, fokus istraživanja je bio na fondu zgrada koje trenutno koriste prirodni gas za grejanje. Glavno pitanje koje se pred ABM model postavlja jeste kako se pojedinačne odluke unutar domaćinstava menjaju prema različitim „intervencionističkim“ energetskim politikama. Model predviđa detalje o tipovima stanova, nivou izolacije, sistemima grejanja, gasnoj

mreži i mreži daljinskog grejanja. U konkretnoj studiji, analizirane su politike podsticaja i politika isključenja domaćinstava sa gasne infrastrukture. Rezultati su pokazali da u slučaju politike podsticaja, domaćinstva sa ograničenim nivoom prihoda preferiraju zamenu sistema grejanja, umesto izolacije stanova.

Tian i Chang (2020) su uspostavili model zasnovan na agentima kako bi ispitali potencijal za povećanje korišćenja čiste energije u domaćinstvima i za smanjenje zagađenja vazduha koje potiče od sagorevanja uglja u domaćinstvima u Kini. U modeliranju autori polaze od pretpostavke da je zamena postojećih tehnologija složen proces i na nju utiče kombinacija faktora kao što su geografski položaj i prihodi domaćinstva. Dizajnirano je pet vrsta agenata. Među njima, region služi i kao agent i okolina, a ostali agenti su domaćinstva (koja igraju vitalnu ulogu), operateri postrojenja, uređaji i goriva. Kako autori zaključuju, jaz u troškovima između „čiste“ i „prljave“ energije određuje spremnost domaćinstava da pređu na „čistu“ energiju. Sa povećanjem prihoda i dodavanjem subvencija, ta spremnost će se povećavati. Pored toga, sa padom troškova „čiste“ energije, dodatni kapitalni troškovi tranzicije (prelaska) će se smanjiti, a samim tim i sve više domaćinstava će birati da zamene tehnologije.

Bayer i dr. (2017) razvili su simulacioni model zasnovan na agentima sa ciljem simulacije tržišta drvne biomase i grejanja u domaćinstvima. U modelu su definisani različiti agenti, kao što su domaćinstva, šumarska preduzeća, proizvođači peleta i vlasnici pilana. Model je razvijen za podršku u procesu odlučivanja u energetsom planiranju. Model prati brzinu zamene postojećih sistema grejanja, a inicijalni pokretač za zamenu postojećeg sistema grejanja je kraj životnog veka trenutnog sistema grejanja. Zaključci autora o primeni ABM modeliranja jesu da ova metoda može biti korisna za procenu dinamike tržišta i mogućih ishodišta novih politika, budući da se na ovaj način individualni aspekti ponašanja tokom procesa odlučivanja mogu uzeti u obzir. Štaviše, ova metoda dozvoljava simulaciju različitih scenarija tokom dugog vremenskog horizonta. Ipak, da bi model što više odgovarao realnom sistemu, autori ističu da je potrebno uvek težiti da se broj pretpostavki smanji i zamene empirijskim podacima.

Jensen i dr. (2015) u razvoju ABM simulacionog modela su pošli od pretpostavke da je ponašanje domaćinstava u pogledu grejanja ključno za smanjenje potražnje za energijom u sektoru domaćinstva, s obzirom da se na grejanje troši najveći deo energije u ovom sektoru. Promene u obrascima grejanja, osim ušteda, mogu dovesti i do ublažavanja klimatskih promena. Svrha primene modela jeste da se kroz simulacije ponašanja domaćinstava dobiju povratne informacije o difuziji pametnih tehničkih uređaja koji pružaju povratne informacije domaćinstvima o uštedama. Ovakvi uređaji bi mogli doprineti uštedama energije od 10 do 30%. Radi ubrzanja difuzije ovih uređaja, autori predlažu aktivnu politiku koja ima za cilj da podstakne razmenu informacija. Predloženi okvir je koristan za bolju identifikaciju i eventualnu procenu efekata koji utiču na ponašanje u vezi sa potrošnjom energije.

Lee T. i dr. (2014) su razvili ABM model koji modelira ponašanje pojedinačnih vlasnika kuća i stanova koji je primenjen u analizi aktuelne energetske politike. Rezultati pokazuju da politika koja je na snazi neće doprineti ostvarenju 100% od zacrtanih ciljeva i sugerišu da je potrebno preispitati trenutne nivoe subvencija. U modelu je zapaženo da subvencije nude previše podrške nekim tehnologijama i da nisu neselektivne, što zauzvrat dovodi do potiskivanja drugih tehnologija koje imaju veći potencijal za uštedu energije. Ovako razvijen model može da se koristi od strane donosilaca odluka, odnosno kreatora politike da razviju dodatne scenarije i pronađu alternativne i efikasnije instrumente politike. Model je prikazan na studiji slučaja sektora domaćinstva u Engleskoj.

Sopha i dr. (2011) predlažu ABM za identifikaciju potencijalnih intervencija za podsticanje uvođenja grejanja na pelet u Norveškoj. Agenti unutar ovog modela predstavljaju specifična domaćinstva za koja su prikupljeni empirijski podaci pomoću ankete na uzorku od 270 domaćinstava. Domaćinstva su povezana mrežom preko koje međusobno komuniciraju prilikom donošenja odluka. Izlazni podaci iz predloženog modela su broj domaćinstava koja prihvataju pelet, odnosno, koja ne prihvataju pelet, po različitim scenarijima. Period za koji su vršene simulacije je 10 godina. Rezultati simulacije

pokazuje da finansijska podrška koja se ogleda u stabilnoj ceni peleta i tehnološki razvoj ove tehnologije, koji će dovesti do veće priuštivosti ovog načina grejanja, predstavljaju uslov za porast broja domaćinstava koja bi se grejala na pelet.

Analizirajući navedene studije, uviđa se da su fokusirane na istraživanja budućih efekata energetske tranzicije u sektoru domaćinstva i na pitanja koja proizilaze iz toga – emisije gasova staklene bašte, korišćenje OIE, korišćenje inovativnih tehnologija, uštede energije, održivo korišćenje prirodnih resursa, buduća struktura potražnje za energijom i sl. Može se zaključiti da se ABM, kao metod modeliranja i simulacija, pokazao primenljivim u ovoj oblasti istraživanja, jer nudi dobro okruženje za inkorporiranje različitih socioloških i tehničkih aspekata koji su relevantni za energetske tranzicije u domaćinstvima. Takođe, ABM pristup nudi fleksibilnost u definisanju strukturnih elemenata sistema i u isto vreme može da koristi velike baze podataka. Da bi modeliranje procesa donošenja odluka u domaćinstvu bilo što realističnije, autori obično koriste dostupna istraživanja ili sprovode *ad hoc* istraživanja u cilju prikupljanja empirijskih podataka za konkretne slučajeve. Takođe, prilikom analize instrumenata za podršku energetske tranzicije koriste se najbolje dostupne prakse iz energetske politike na lokalnom, nacionalnom i međunarodnom nivou.

## **5. ISTRAŽIVANJE O GREJANJU U DOMAĆINSTVIMA U REPUBLICI SRBIJI**

Za razliku od velikih energetske potrošača i emitera zagađujućih materija i gasova staklene bašte, sektor domaćinstava karakteriše fragmentiranost potrošnje u male jedinice. Takođe, primetno je izražena heterogenost kod načina grejanja domaćinstava, koja se ogleda u različitim konfiguracijama sistema grejanja, gorivima koja se koristi, starosti sistema itd. Osim potrebe prikupljanja informacija o osnovnim karakteristikama pojedinačnih sistema grejanja, da bi se analizirala energetska tranzicija u domaćinstvima potrebno je prikupiti informacije i o drugim aspektima. Pre svega, potrebno je prikupiti informacije kao što su: prihvatljivost određenih sistema grejanja, raspoloživost sistema na tržištu, priuštivost sistema grejanja od strane domaćinstava, lokacijski uslovi za instalaciju sistema grejanja, odnos prema lokalnom zagađenju, odnos prema subvencijama i dr. Štaviše, ponašanje domaćinstva je prepoznato u literaturi kao dominantan činilac potrošnje energije za grejanje i načina grejanja (Hu i dr., 2017), (Kane i dr., 2017).

Odnos domaćinstava prema potencijalnim podsticajima za kupovinu modernijih uređaja ili zabranama korišćenja određenih zastarelih tehnologija, kao i percepcija važnosti energetske tranzicije domaćinstava, značajno varira između regiona i država. Step en ekonomskog i tehnološkog razvoja, političke stabilnosti, obrazovne strukture stanovništva, životnog standarda, samo su neki od uticajnih faktora koji utiču na ove razlike (Bartiaux, 2011). Takođe, podaci o osnovnim preprekama, kao i pokretačima energetske tranzicije ka održivijem grejanju<sup>1</sup> takođe su neophodni za sveobuhvatno upoznavanje sa ovom problematikom i eventualnim energetske planiranjem. Posedovanje navedenih podataka doprinosi da se stekne preciznija slika o stanju i perspektivi za ostvarenje energetske tranzicije i da se dobiju polazne osnove za preciznije projektovanje energetske tranzicije za procenu efekata konkretnih mera i instrumenata energetske politike (Parrish i dr., 2020).

Hu i dr. (2017) apostrofiraju suštinski značaj istraživanja o preprekama i pokretačima, odnosno stavovima domaćinstava, za prikupljanje empirijskih podataka iz sektora domaćinstva. Empirijske studije o grejanju domaćinstava, zasnovane najčešće na anketiranju domaćinstava, široko su rasprostranjene u literaturi (Hu i dr., 2017), (Parrish i dr., 2020), (Eurostat, 2013), (Al Qadi i dr., 2018), (Elmustapha i dr., 2018), (Liu i dr., 2021), (Kim i dr., 2019), (Michelsen i Madlener, 2016), (Biresselioglu i dr., 2019), (Du i dr., 2014). Najčešće teme ovih studija u oblasti energetske tranzicije domaćinstava u poslednjih deset i više godina jesu pitanja energetske tranzicije ka održivijem grejanju.

Kada je u pitanju Republika Srbija, nešto manje od 25% domaćinstava povezano je na sisteme daljinskog grejanja u gradovima i opštinama (TOPS, 2021). Preostalih oko 75% domaćinstava greje se pomoću individualnih sistema grejanja, najviše baziranih na čvrstim gorivima (drvnoj biomasi i uglju) i električnoj energiji. Međutim, na nacionalnom nivou ne postoji sistemsko praćenje stanja koje bi omogućilo dostupnost informacija o individualnim sistemima grejanja, kao što su npr. dominantni energenti, starost sistema grejanja, konfiguracija sistema, potrošnja, stavovi domaćinstava i sl. Republički zavod za statistiku (RZS) publikuje godišnje istraživanje „Anketa potrošnje domaćinstava“ (RZS, 2020a), u kome je jedan deo rezervisan i za grejanja domaćinstava. Međutim, zbog svrhe i obima istraživanja, podaci su ograničeni i odnose se isključivo na strukturu domaćinstava na osnovu energenata koji se dominantno koriste za grejanje. Čak i sama struktura prema energentima koji se koriste za grejanje nije dovoljno detaljna, jer su na primer domaćinstva grupisana u kategoriju onih koja se greju na čvrsta goriva, bez daljeg preciziranja da li se radi o ogrevnom drvetu, peletu, poljoprivrednoj biomasi, uglju i sl. (RZS, 2020a).

Prvo detaljnije istraživanje o načinu grejanja u domaćinstvima publikovano je 2021. godine od strane RZS-a pod nazivom „Potrošnja energije u domaćinstvima u Republici Srbiji“ (RZS, 2021a).

---

<sup>1</sup> Održivije grejanje podrazumeva veću zastupljenost obnovljivih izvora energije, efikasnije korišćenje energije, dugoročno isplativije grejanje i grejanje koje ima manje negativnog uticaja na životnu sredinu (Liu i dr., 2021).

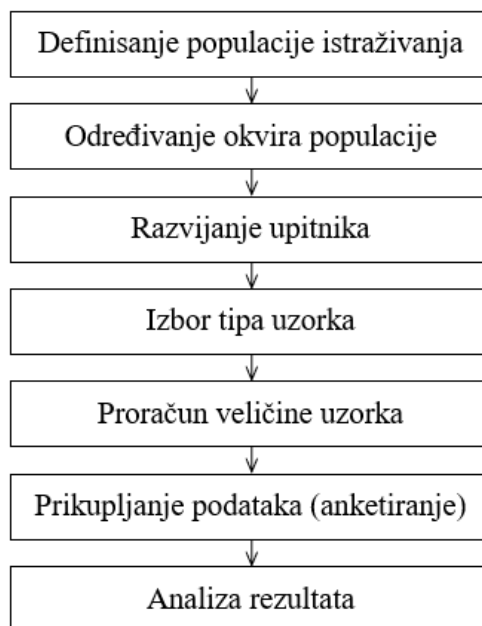
Objavljena studija je usmerena na istraživanje o potrošnji različitih energenata i goriva u domaćinstvima, sa posebnim osvrtom na potrošnju OIE, posebno biomase. Istraživanje je obuhvatilo grejanje prostora, hlađenje prostora, grejanje vode, kuvanje, ostale električne uređaje i druge krajnje upotrebe energije. Istraživanje je bazirano na intervjuisanju domaćinstava pomoću unapred definisanog upitnika. Ova studija daje opširnije podatke o grejanju domaćinstava, o vrsti energenata, potrošnji, tipu sistema grejanja (centralno, individualna grejna tela, daljinsko grejanja) i sl., što svakako olakšava zainteresovanim stranama upoznavanje sa ovom oblašću koja je dugo bila analizirana na osnovu skromnih baza podataka i ekspertskih procena. Međutim, kako se predmetna studija odnosi na celokupnu populaciju domaćinstava u Srbiji, dakle ne samo na domaćinstva sa individualnim sistemima grejanja, već i na domaćinstva povezana na sisteme daljinskog grejanja, javlja se problem kod tumačenja podataka. Naime, tumačenje pojedinih podataka koji se odnose na domaćinstva sa individualnim sistemima grejanja otežano je, jer su podaci prikazani združeno, dakle, i za daljinsko i za individualno grejanje. Pored toga, ovo istraživanje nije za predmet imalo stavove domaćinstava u pogledu energetske tranzicije ka održivijim sistemima grejanja, kao ni identifikaciju i ispitivanje osnovnih prepreka i pokretača za održivije grejanje, odnos prema uticaju okruženja i javnog mnjenja kada je u pitanju tema grejanja i sl.

Da bi se obezbedili ulazni podaci za simulacioni model energetske tranzicije u grejanju domaćinstava, 2020. godine je sprovedeno je istraživanje koja je obuhvatilo 1.100 domaćinstava na teritoriji Srbije (Pavlović i dr., 2021). Populacija istraživanja su bila domaćinstva koje se greju pomoću individualnih sistema grejanja, koja predstavljaju najbrojniju kategoriju domaćinstava i istovremeno kategoriju koju izrazito odlikuje već pomenuta heterogenost. Ova heterogenost, osim razlika u načinu grejanja, dominantnim energentima, karakteristikama i starosti sistema grejanja, ogleda se i u razlikama u stavovima domaćinstava o energetskej tranziciji, preprekama i pokretačima za njeno odvijanje i spremnosti da se zameni zastareli način grejanja. Polazna pretpostavka je bila da se prikupljanjem navedenih podataka, pomoću istraživanja na reprezentativnom uzorku, mogu osigurati potrebni ulazni podaci koji nedostaju za simulacioni model, a od značaja su za tranziciju u grejanju domaćinstava.

Cilj sprovedenog istraživanja je bio da se ispita trenutno stanje individualnih sistema grejanja u sektoru domaćinstva, da se utvrde osnovne karakteristike domaćinstava, karakteristike sistema grejanja i da se identifikuju osnovne prepreke, pokretači i stavovi domaćinstava o pitanjima vezanim za energetskej tranziciju ka održivijim sistemima grejanja. Kako svi navedeni podaci značajno variraju od domaćinstva do domaćinstva, anketa, kao metoda prikupljanja podataka sa dugom praksom primene u istraživanju društvenih fenomena (Liu i dr., 2021), nametnula se kao optimalna metoda.

Osnovni koraci u sprovedenom istraživanju o grejanju domaćinstava u Republici Srbiji su prikazani na Slici 16.





Slika 16. Osnovni koraci u istraživanju domaćinstava

U ovom istraživanju, pojam grejanje domaćinstva podrazumeva korišćenje energije za obezbeđenje toplote za grejanje stambenog prostora. Jedinica posmatranja je svako domaćinstvo koje se greje pomoću individualnog sistema grejanja (centralno grejanje ili individualna grejna tela). Domaćinstvom se smatra (RZS, 2020a):

- zajednica čiji članovi zajedno stanuju, zajedno se hrane i troše ostvarene prihode;
- samac koji samostalno živi, samostalno se hrani i troši ostvarene prihode.

Na osnovu poslednjeg Popisa stanovništva, ukupan broj domaćinstava u Srbiji je 2.487.886 (RZS, 2013). Okvir populacije, odnosno broj domaćinstava koja se greju pomoću individualnih sistema grejanja, dobijen je oduzimanjem broja domaćinstava koja su povezana na sisteme daljinskog grejanja (636.880 domaćinstava) (TOPS, 2021) od ukupnog broja domaćinstava. Kao rezultat, definisan je okvir populacije, tj. ciljna populacija od 1.851.006 domaćinstava.

### 5.1. Upitnik za sprovođenje istraživanja

Upitnik za sprovođenje istraživanja je nastao kao plod analize i sistematizacije dostupne literature o međunarodnoj praksi anketiranja domaćinstava o potrošnji energije i načinu grejanja. Tabela 3 daje sumiran prikaz pregleda literature. U trećoj koloni Tabele 3 prikazani su ciljevi analiziranih istraživanja i osnovne oblasti koje su bile predmet istraživanja.

Tabela 3. Pregled istraživanja o potrošnji energije u domaćinstvima

Izvor	Cilj istraživanja	Oblasti istraživanja
(EIA, 2001)	Potrošnja energije u stambenim objektima u Sjedinjenim Američkim Državama	Karakteristike sistema grejanja; Vrste goriva; Potrošnja.
(Eurostat, 2013)	Potrošnja energija za grejanja domaćinstava u EU	Karakteristike domaćinstva; Grejna površina, Energetska efikasnost objekata.

(INOGATE, 2014)	Energetska potrošnja u domaćinstvima	Grejanje stambenog prostora; Grejanje vode, Kuvanje; Vrste goriva.
(Michelsen i Madlener, 2016)	Barijere i pokretači za zamenu sistema grejanja u domaćinstvima u Nemačkoj	Vrste goriva; Starost domaćinstva i članova domaćinstva; Grejna površina; Motivacija za zamenu sistema i energenata.
(Hu i dr., 2017)	Energetska potrošnja i ponašanje korisnika energije u domaćinstvima u Kini	Broj članova domaćinstva; Grejna površina, Vrsta sistema grejanja; Potrošnja; Obrasci ponašanja; Zadovoljnost trenutnim sistemom grejanja.
(Boemi et al., 2017)	Problem energetske siromaštva kod grejanja domaćinstva u severnom delu Grčke	Vrste sistema grejanja; Kvalitet života i termalni komfor u zimskim mesecima; Priuštvost grejanja; Mere energetske efikasnosti.
(Al Qadi i dr., 2018)	Energetska potrošnja u stambenim objektima u Palestini	Tip naselja; Veličina domaćinstva; Izolacija objekta; Dužina grejne sezone; Vrsta sistema grejanja.
(Elmustapha i dr., 2018)	Analiza prihvatanja sistema grejanja baziranih na solarnoj energiji	Broj članova domaćinstva; Karakteristike domaćinstva; Primanja članova domaćinstva; Starost članova domaćinstva; Broj domaćinstava koja prihvataju ovaj način grejanja.
(WHO, 2019)	Praćenje potrošnje energije u domaćinstvima	Vrste energenata i sistema za grejanje stambenog prostora i kuvanje.
(Kim i dr., 2019)	Volja potrošača da plate održive sisteme grejanja u Južnoj Koreji	Karakteristike sistema grejanja; Karakteristike domaćinstva/potrošača.
(Miu et al., 2019)	Analiza percepcije potrošača nakon instalacije pametnih sistema grejanja	Vrste sistema grejanja; Karakteristike objekta; Troškovi grejanja.
(Niamir et al., 2020)	Bihevioralni aspekti potrošnje energije i navike potrošača	Socio-demografski činioci; Karakteristike domaćinstva.
(Jiang et al., 2020)	Grejanje u urbanim sredinama u region reke Jangce, Kina	Informacije o objektima; Struktura domaćinstva; Navike potrošača; Vrsta sistema grejanja.
(Frankowski and Herrero, 2021)	Motivacija za zamenu sistema grejanja baziranih na čvrstim gorivima u Severnoj Poljskoj	Broj članova domaćinstva; Veličina objekta; Termalni komfor; Troškovi; Energetske uštede.

Na osnovu pregleda navedenih izvora u Tabeli 2, razvijen je upitnik za potrebe ankete domaćinstava u Srbiji. Upitnik se sastoji od kombinacije otvorenih i zatvorenih pitanja koja se mogu podeliti u tri dela:

- Prvi deo se odnosi na pitanja o osnovnim karakteristikama domaćinstva koje mogu biti relevantne za grejanje;
- Drugi deo se odnosi na pitanja o trenutnom sistemu grejanja i njegovim karakteristikama;
- Treći deo se odnosi na pitanja o stavovima domaćinstava o energetskej tranziciji i osnovnim preprekama i pokretačima za uvođenje održivijeg grejanja.

Sadržaj ankete prikazan je u Tabeli 4.

Tabela 4. Sadržaj ankete po glavnim oblastima

Deo	Oblast	Sadržaj
1.	Osnovne karakteristike domaćinstva	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Grejna površina (m<sup>2</sup>)</li> <li>– Broj članova domaćinstva</li> <li>– Godina izgradnje</li> <li>– Mere termalne izolacije na objektu</li> </ul>
2.	Karakteristike trenutnog sistema grejanja	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Gorivo/energent</li> <li>– Kuvanje na čvrsta goriva</li> <li>– Tip i konfiguracija sistema grejanja</li> <li>– Starost sistema grejanja</li> <li>– Potrošnja</li> </ul>
3.	Ponašanje i stavovi domaćinstva	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Praćenje potrošnje</li> <li>– Termalni komfor</li> <li>– Spremnost da se više plati za održivije grejanje</li> <li>– Prepreke i pokretači</li> <li>– Prioriteti kod izbora načina grejanja</li> <li>– Uticaj okruženja na izbor načina grejanja</li> <li>– Stavovi prema merama podsticaja</li> </ul>

## 5.2. Proces anketiranja

Telefonsko anketiranje, kao jedna od tehnika anketiranja, sprovedeno je u periodu od oktobra do decembra meseca 2020. godine. Telefonsko anketiranje ima određene prednosti. Dozvoljava da uzorak bude geografski dispergovan i da se jednostavnije sakupljaju podaci iz različitih međusobno udaljenih mesta, posebno u ruralnim i razućenim naseljima (Jennings, 2005). Telefonska anketa za razliku od anketiranja „licem u lice“ obezbeđuje određeni stepen anonimnosti, jer nema direktnog upoznavanja, što obezbeđuje veći stepen otvorenosti kod nekih ispitanika. Troškovi putovanja i vreme koje se provodi u putu su na ovaj način takođe izbegnuti (Szolnoki i Hoffmann, 2013). Pored

toga, imajući u vidu pandemiju Kovid-19 virusa, telefonska anketa je sprečila neposredan kontakt i osigurala bezbednost anketara i anketiranih lica u domaćinstvima.

Osnovni nedostatak telefonske ankete je ograničeno vreme (Boland i dr., 2006). Kako su telefonskim pozivom anketirana lica najčešće prekinuta u obavljanju drugih aktivnosti, praksa je pokazala da razgovori ne bi smeli da budu duži od 10 do 15 minuta. Ovo ograničava broj pitanja, otvaranje diskusije i nameće da se anketar fokusira na veći broj tzv. „zatvorenih pitanja“ u kojima se nude unapred ponuđeni odgovori ili ocene (Jennings, 2005).

U anketi su učestvovala lica iz domaćinstva koja po sopstvenom priznanju dobro poznaju ili su upoznata sa načinom grejanja u domaćinstvu. Samo domaćinstva koja poseduju iskustvo grejanja na navedenoj lokaciji bar od prethodne grejne sezone su anketirana. Na ovaj način osigurano je da anketirana domaćinstva mogu odgovoriti na pitanja koja se tiču potrošnje, troškova, zadovoljstva trenutnim sistemom i sl. Anketa je planirana i vođena tako da se u sakupljanju odgovora, analizi i objavljivanju rezultata izbegne mogućnost identifikacije anketiranih lica po bilo kom osnovu. Kao što se može uočiti u Tabeli 3, pitanja su formulisana na taj način da se od ispitanika nisu tražile informacije koje se odnose na podatke o ličnosti.

### 5.3. Tip i veličina uzorka

Tip uzorka je dvoetajni stratifikovani uzorak (Kotz et al., 2004). Kod stratifikovanog uzorka, ciljna populacija je podeljena u nepreklapajuće subpopulacije – stratume (*lat. strata*, u prevodu na srpski – sloj). Stratumi se smatraju za zasebne delove u kojima se uzorkovanje može obaviti nezavisno od drugih delova. Kako je Srbija podeljena na regionalne administrativne oblasti koje se ne preklapaju i kako je metodologija Republičkog zavoda za statistiku za ispitivanje sličnih pojava na nivou države bazirana na stratifikovanom uzorku prema statističkim regionima (RZS, 2020b), u ovoj anketi je primenjena ista podela u prvoj etapi uzorkovanja na stratume prema statističkim regionima (Slika 17). Na ovaj način se obezbeđuje proporcionalni udeo svakog regiona u ukupnom uzorku. U drugoj etapi, unutar stratuma, primenjeno je jednostavno nasumično uzorkovanje za izbor osnovne jedinice posmatranja, tj. domaćinstva. Jednostavno nasumično uzorkovanje iz populacije osigurava da svako domaćinstvo iz populacije ima jednaku verovatnoću da bude izvučeno u uzorak (Eurostat, 2008).



Slika 17. Statistički regioni u Srbiji<sup>2</sup> (RZS, 2020b)

<sup>2</sup> Od 1999. godine RZS, kao glavno telo za vođenje zvanične statistike u državi, ne raspolaže pojedinim podacima za Kosovo i Metohiju, pa iz tog razloga ova anketa nije uključila u pokrivenost region Kosova i Metohije.

Kada je u pitanju broj ispitanika u anketama koje se bave energetikom, ne postoji apsolutno obavezujuće pravilo. Veličina uzorka pre svega zavisi od prihvatljive margine greške i intervala pouzdanosti. Uvidom u istraživanja sa sličnom tematikom, uobičajena margina greške je između 3% i 5%, a interval pouzdanosti je 95%. Drugim rečima, ovo znači da se sa 95% sigurnosti može tvrditi da je tačan procenat neke ispitivane pojave u populaciji u rasponu od +/- 3%, odnosno +/- 5%.

Veličina uzorka se računa prema sledećem izrazu:

$$n = \frac{z^2 \times p(1 - p)/e^2}{1 + (z^2 \times p(1 - p)/e^2 N)} \quad (1)$$

gde je:

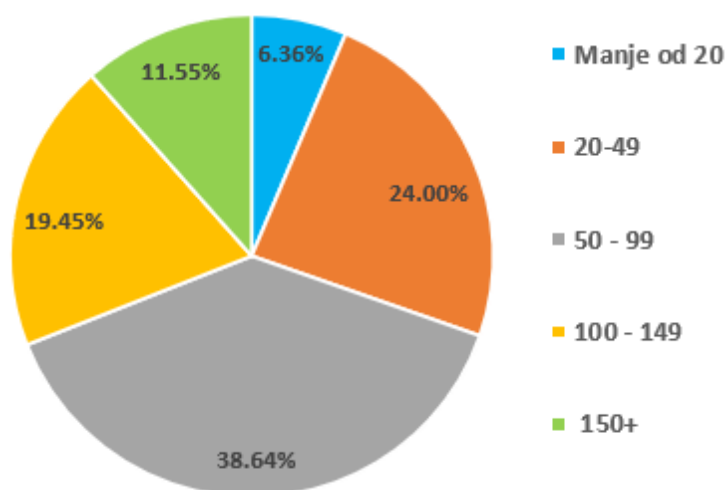
- n** - veličina uzorka;
- z** - vrednost koja je u relaciji sa intervalom pouzdanosti (za interval pouzdanosti 95%, z-vrednost je  $z = 1,96$ );
- p** - proporcija populacije (za najkonzervativnije procene uzima se vrednost  $p = 0,5$ );
- e** - margina greške ( $e = 3\%$ );
- N** - veličina populacije ( $N = 1.851.006$ ).

Uvažavajući predložene vrednosti, utvrđeno je da je potrebna veličina uzorka  $n = 1.067$  domaćinstava. Tokom anketiranja, uspešno je prikupljeno 1.100 kompletiranih anketa.

## 5.4. Rezultati istraživanja

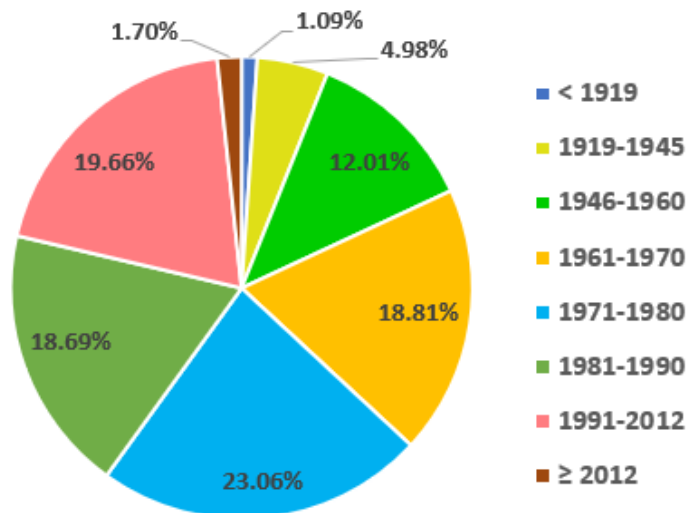
### 5.4.1. Osnovne karakteristike domaćinstava

Slika 18 prikazuje strukturu domaćinstava prema veličini grejne površine. Grejna površina podrazumeva onaj deo domaćinstva koji se greje u većem delu zimske sezone (oktobar – april). Prostorije koji se ne greju ili nisu useljene, kao što su npr. podrum, garaža, tavanke prostorije, nisu obuhvaćene ovim terminom. Najveći udeo domaćinstava u Srbiji sa individualnim sistemima grejanja je do 100 m<sup>2</sup> i iznosi 69%.



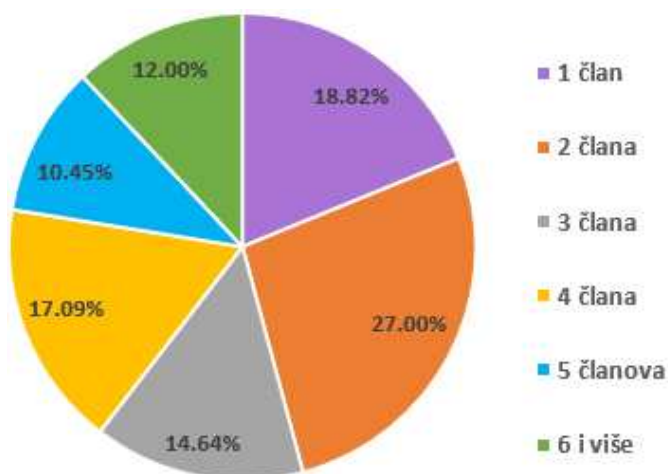
Slika 18. Domaćinstva prema grejnoj površini [m<sup>2</sup>]

Struktura domaćinstava prema periodu (godini) izgradnje stambenog objekta prikazana je na Slici 19. Prema dobijenim podacima, 60,56% stambenih objekata koji se greju pomoću individualnih sistema grejanja je izgrađeno u periodu 1961-1990 što, prema nacionalnoj tipologiji stambenih zgrada u Srbiji (Jovanović Popović i dr., 2013) zadovoljava standarde energetske efikasnosti klase F (godišnja energija potrebna za zagrevanje preko 200 kWh/m<sup>2</sup>) i klase G (godišnja energija potrebna za zagrevanje preko 250 kWh/m<sup>2</sup>).



Slika 19. Domaćinstva prema periodu izgradnje

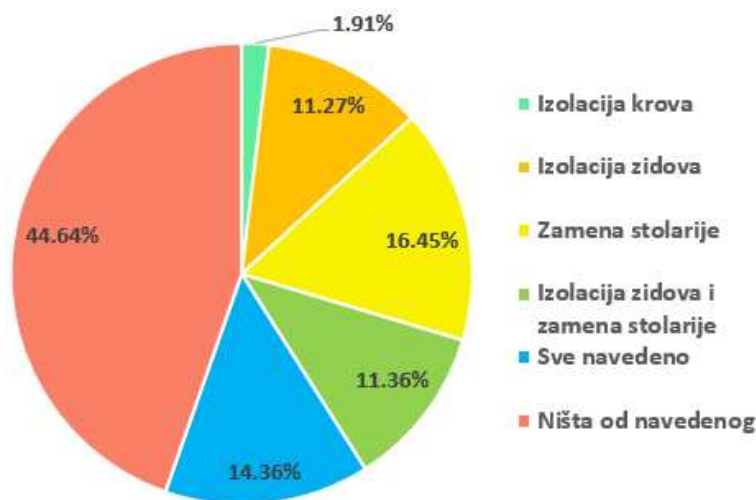
Struktura domaćinstava prema broju članova domaćinstva prikazana je na Slici 20. Prema rezultatima, 45,82% domaćinstava sa individualnim sistemima grejanja su ili tzv. „samačka“ domaćinstva sa jednim članom ili domaćinstva sa dva člana.



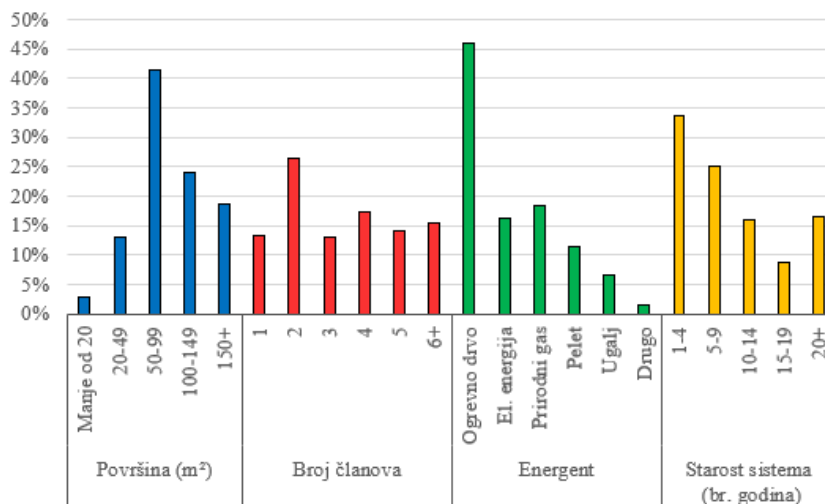
Slika 20. Broj članova domaćinstva

Termoizolacione karakteristike stambenog objekta su važan činilac koji utiče na potrošnju energije za grejanje (Paraschiv Lizica et al., 2017), tako da mere energetske efikasnosti, kao što su izolacija spoljnih zidova, zamena stolarije i sl., povećavaju potencijal za uštedu energije (Zhou et al., 2018). Slika 21 pruža uvid u sprovedene mere energetske efikasnosti u poslednjih 10 godina prema

odgovorima anketiranih domaćinstava. Najveći deo domaćinstava (44,64%) nije sproveo ni jednu od navedenih mera. Kada je reč o domaćinstvima sa sprovedenim merama za termoizolaciju objekta (zamena stolarije, izolacija zidova i izolacija krova ili zamena stolarije i izolacija zidova), njihova struktura je prikazana na Slici 22. Može se uočiti da su mere uglavnom sprovedene od domaćinstava koje su nedavno promenile sistem grejanja (33,57% domaćinstava ima sistem grejanja mlađi od 4 godine). Dominantni energenti u ovim domaćinstvima su ogrevno drvo (45,94%), prirodni gas (18,37%), električna energija (16,25%) i pelet (11,31%).



Slika 21. Sprovedene mere energetske efikasnosti na objektu u poslednjih 10 godina

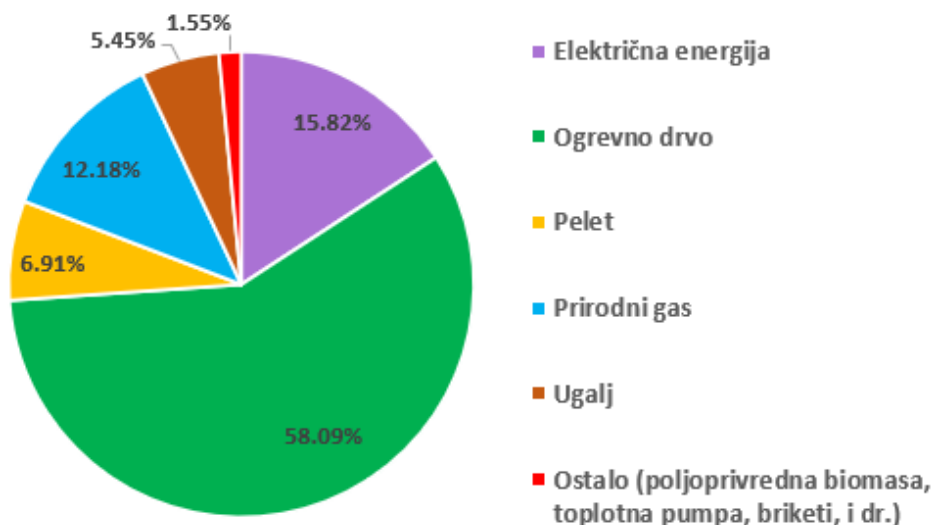


Slika 22. Struktura domaćinstava sa sprovedenim merama energetske efikasnosti

#### 5.4.2. Osnovne karakteristike sistema za grejanje u domaćinstvima

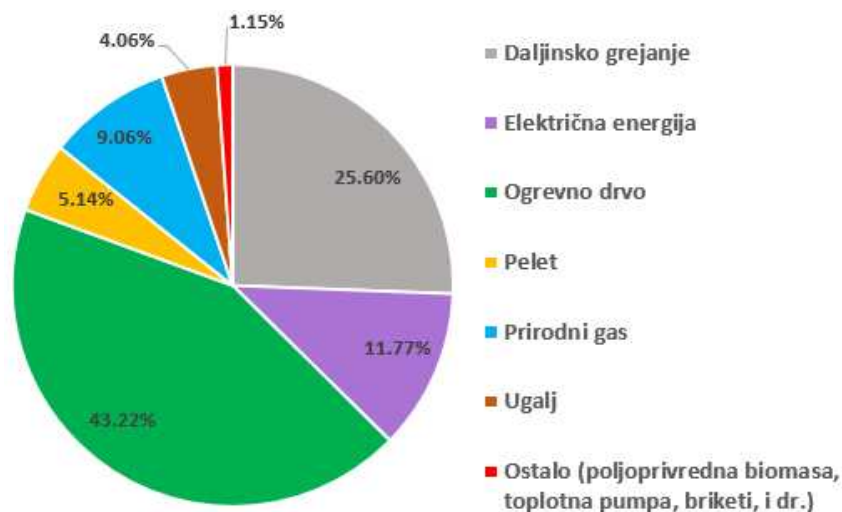
Struktura domaćinstava prema dominantnom energentu na kome se bazira sistem grejanja prikazana je na Slici 23. U slučaju da se domaćinstvo (ispitanik) izjasnilo da koristi više energenata ili različite sisteme za grejanje, od ispitanika je traženo da identifikuje dominantan vid grejanja. Iz strukture se uočava da je više od polovine sistema grejanja (58,09%) bazirano na ogrevnom drvetu kao energentu. U kategoriji „Ostalo“ nalaze se sistemi grejanja koji su bazirani na energentima koji pojedinačno

gledano zauzimaju manje od 1% udela u populaciji, kao npr. toplotne pumpe koje se baziraju na korišćenju OIE i električne energije ili poljoprivredna biomasa.



Slika 23. Struktura domaćinstava prema dominantnim energentima

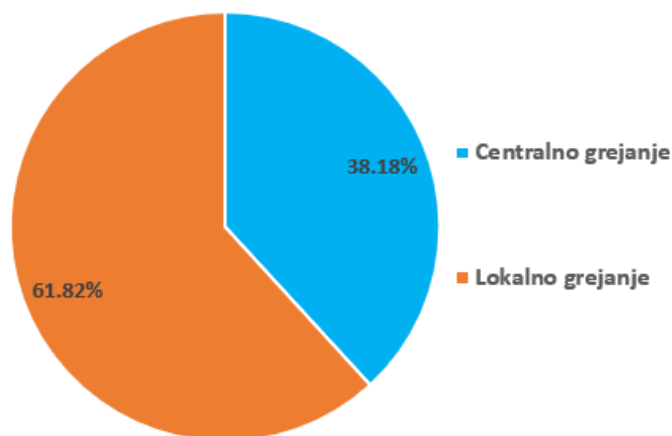
Postavljanjem dobijenih rezultata iz anketa (Slika 23) u korelaciju sa brojem domaćinstava u Srbiji koja su povezana na sisteme daljinskog grejanja (TOPS, 2021), moguće je prikazati i strukturu svih domaćinstava prema načinu na koji se greju (Slika 24).



Slika 24. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja (individualni sistemi + daljinsko grejanje)

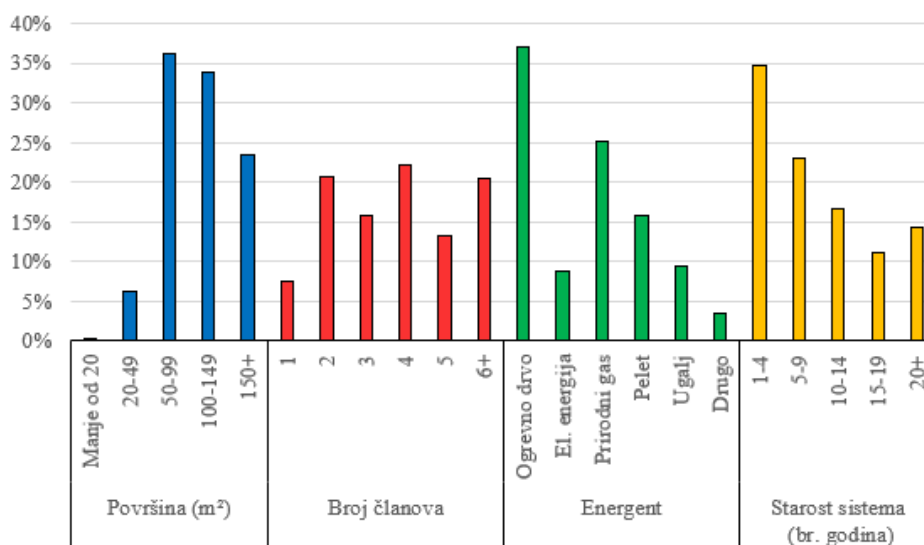
Konfiguracija individualnih sistema grejanja prikazana je na Slici 25. Podela je izvršena na centralno grejanje i lokalna grejna tela, tj. na grejanje koje podrazumeva generisanje toplotne energije na jednom mestu, u centralnoj jedinici sistema, koja se potom sprovodi do grejnih tela (Kubba, 2017), i grejanje pomoću grejnih tela ili uređaja koji se nalaze u samoj prostoriji koja se greje.



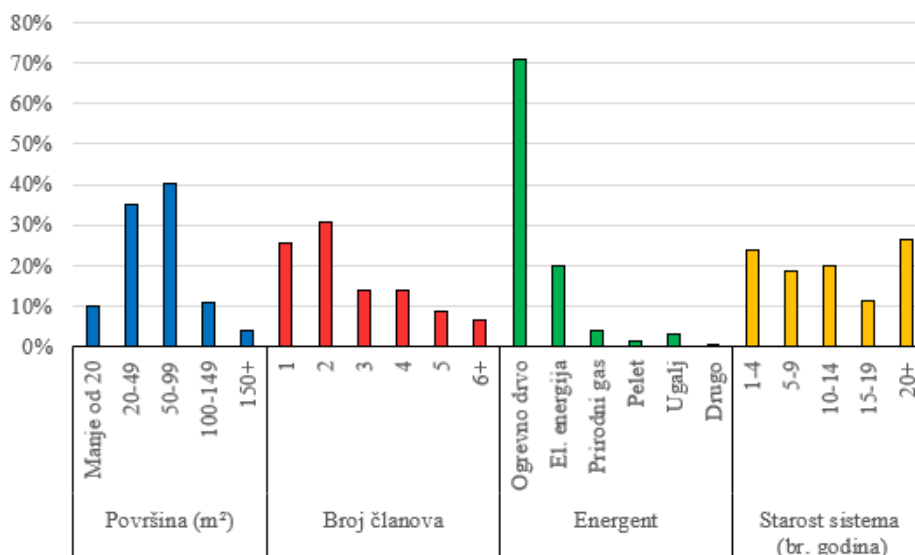


Slika 25. Konfiguracija individualnih sistema grejanja

Na Slikama 26 i 27 prikazana je struktura domaćinstava sa centralnim grejanjem i lokalnim grejnim telima, u cilju poređenja osnovnih karakteristika jednog i drugog vida grejanja. Uočava se razlika u udelu dominantnih energenata kod centralnog grejanja – ogrevno drvo (37,14%), prirodni gas (25,24%) i pelet (15,71%), u odnosu na lokalna grejna tela gde je ogrevno drvo zastupljeno sa 71% i električna energija sa 20,15%. Takođe, uočava se da su sistemi centralnog grejanja više zastupljeni u domaćinstvima sa većom grejnom površinom i većim brojem članova domaćinstva, kao i da su to nešto mlađi sistemi, tj. da su u skorije vreme instalirani u domaćinstvima, u odnosu na lokalna grejna tela.

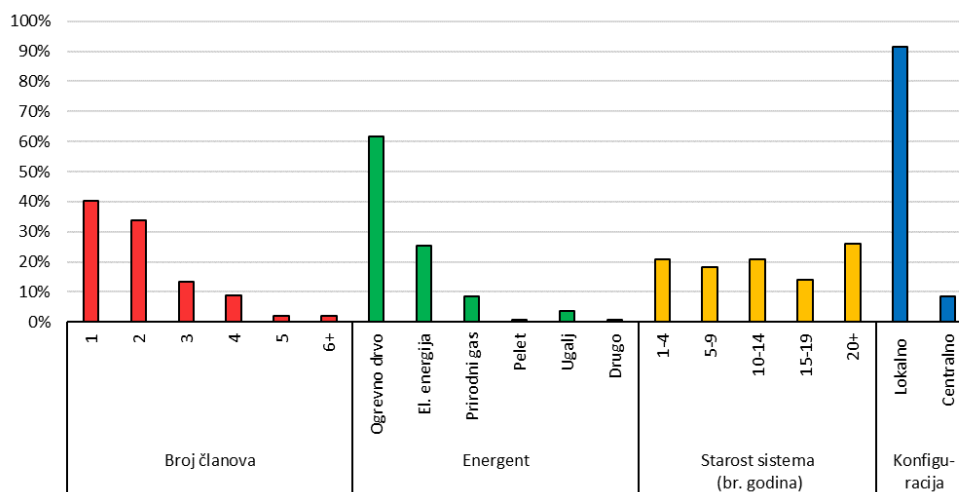


Slika 26. Struktura domaćinstava sa centralnim grejanjem



Slika 27. Struktura domaćinstava sa lokalnim grejnim uređajima/telima

Kada se analizira struktura domaćinstava koja greju površinu stambenog prostora do 49 m<sup>2</sup>, zastupljenost ogrevnog drveta (oko 62%) i električne energije (oko 25%) je još dominantnija, sa izraženom zastupljenošću lokalnih sistema grejanja (najčešće jedan šporet, peć ili grejalica koji su namenjeni za grejanje površina od 20 do 30 m<sup>2</sup>) (oko 92%) (Slika 28). Domaćinstva iz ove kategorije su najčešće samačka (oko 40%) ili sa dva člana (oko 34%). Ovi podaci posredno mogu ukazati da domaćinstva koja greju samo jednu ili par prostorija, a ne celu stambenu površinu, prvenstveno se odlučuju za sisteme grejanja koji su bazirani na ova dva energenta.

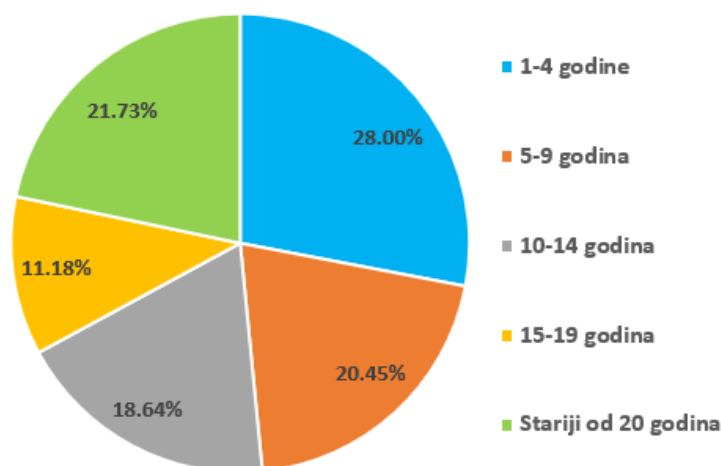
Slika 28. Struktura domaćinstava grejne površine 0 - 49 m<sup>2</sup>

Osim konfiguracije sistema, u anketi su ispitivane i druge osobine individualnih sistema grejanja u domaćinstvima. Tabela 5 sumira ove rezultate.

Tabela 5. Ostale osobine individualnih sistema grejanja

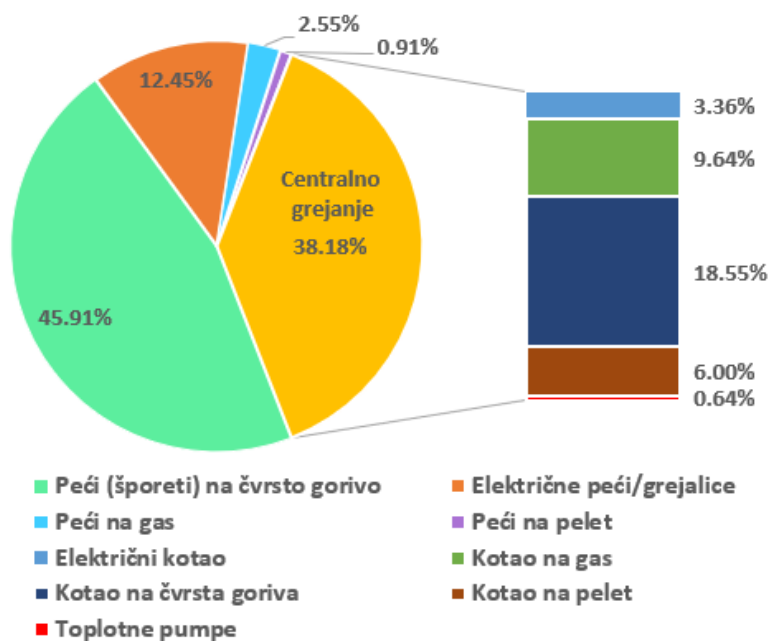
<b>Regulacija temperature</b>	
Sistemi grejanja sa termostatom	51.18%
Sistemi grejanja bez termostata	48.82%
<b>Integracija sistema grejanja sa pripremom tople vode za potrebe domaćinstva</b>	
Samo grejanje	83.55%
Grejanje + topla voda	16.45%
<b>Kombinovano korišćenje sistema grejanja na čvrsta goriva za kuvanje</b>	
Samo grejanje	48.85%
Grejanje + kuvanje	51.15%

Starost sistema grejanja u domaćinstvima prikazana je na Slici 29. Može se uočiti da je oko 1/3 sistema starije od 15 godina.



Slika 29. Starost sistema grejanja

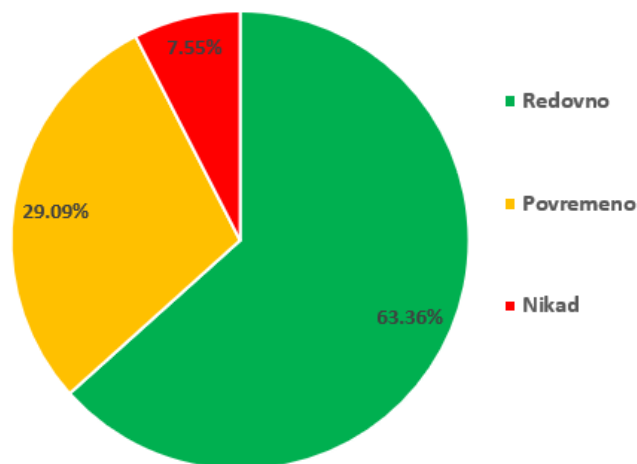
Na Slici 30 prikazani su osnovni tipovi sistema grejanja u domaćinstvima. Sistemi grejanja su grupisani prvenstveno prema energentu na kome se bazira njihova upotreba i prema konfiguraciji. Pojedinačno gledano, najzastupljeniji tip jesu peći i šporeti na čvrsta goriva (prvenstveno na ogrevno drvo) sa 45,91%, zatim slede kotlovi na čvrsta goriva sa 18,55%, različiti tipovi električnih grejalica/peći sa 12,45%, pa kotlovi na gas sa 9,64%, kotlovi na pelet sa 6%. Ostali tipovi sistema zastupljeni su sa manje od 6%.



Slika 30. Struktura domaćinstava prema tipu sistema grejanja

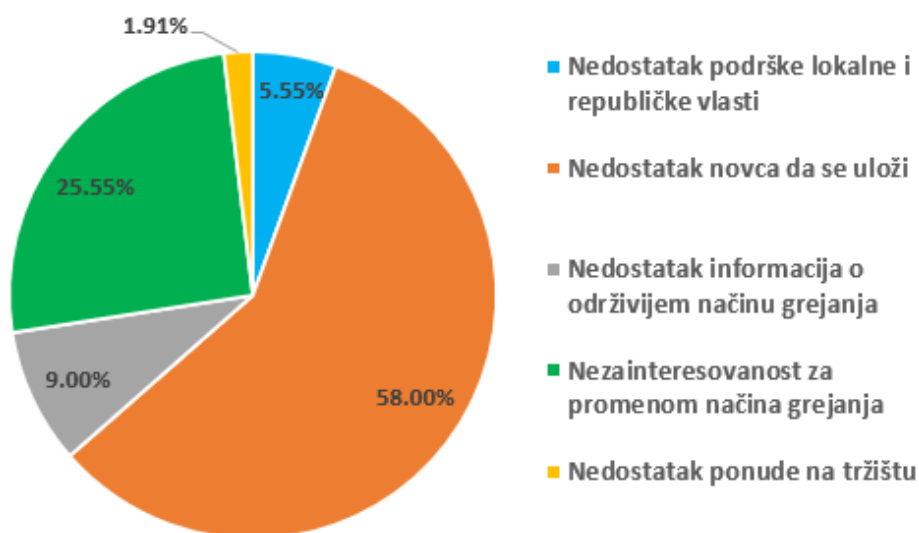
#### 5.4.3. Stavovi domaćinstava

U ovom delu prikazani su rezultati ankete koji se odnosi na stavove domaćinstva o štednji, o energetskej tranziciji, pokretačima i preprekama za održivije grejanje, prioritetima kod izbora načina grejanja i sl., Slika 31 prikazuje da li i u kojoj meri domaćinstva kontrolišu i prate potrošnju energije. Približno 2/3 domaćinstava je izjavilo da redovno kontrolišu potrošnju što ukazuje da savesno i racionalno troše energiju.



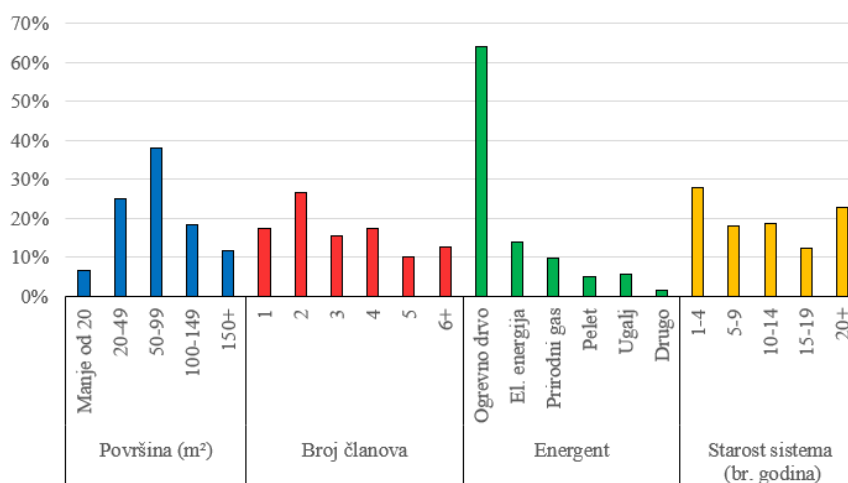
Slika 31. Učestalost kontrole potrošnje energije u domaćinstvu

Glavne prepreke za energetskej tranziciju ka održivijim načinima grejanja koje su domaćinstva istakla prikazane su na Slici 32. Kao što se može videti, najčešće identifikovane prepreke za većinu domaćinstava jeste nedostatak novca da se uloži u zamenu sistema grejanja (58%).



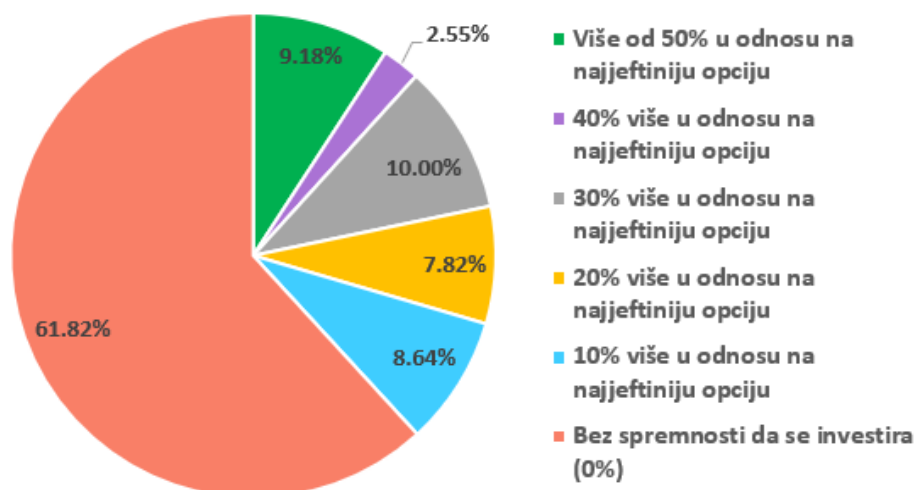
Slika 32. Prepreke za energetska tranziciju ka održivijem grejanju

Kada su u pitanju domaćinstva koja su navela nedostatak novca kao najveću prepreku za instalaciju održivijeg sistema grejanja, njihove osnovne karakteristike prikazane su na Slici 33. Ono što se posebno uočava, to je da 64,11% ovih domaćinstava trenutno ima sisteme grejanja koji su bazirani na ogrevnom drvetu.



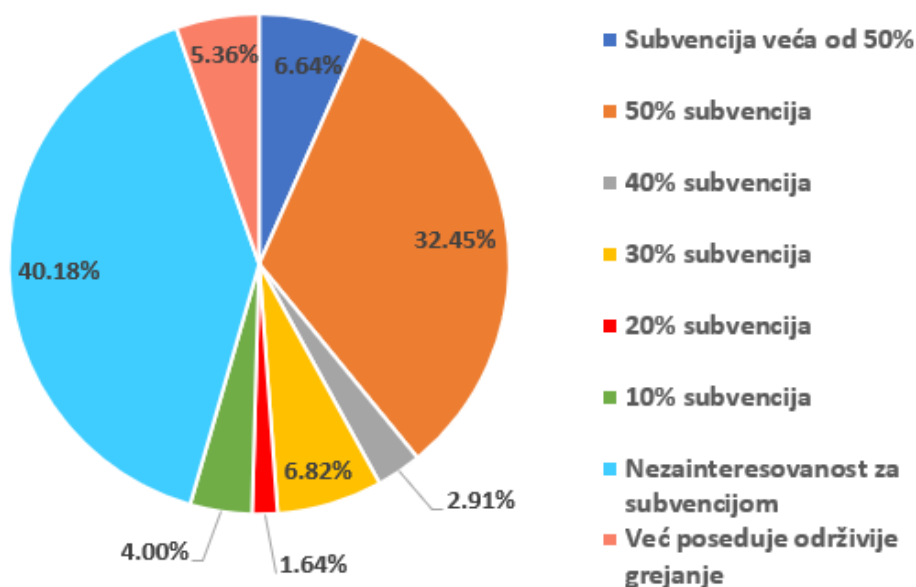
Slika 33. Struktura domaćinstava koja su navela nedostatak novca kao najveću prepreku

Spremnost domaćinstva da investira više u energetska tranziciju grejanja, odnosno, koliko je, izraženo u procentima (%), domaćinstvo spremno da plati više za održivije grejanje u odnosu na najjeftiniju opciju na tržištu, može se videti na Slici 34. Najveći deo anketiranih, oko 61,8%, nisu spremni da dodatno investiraju.



Slika 34. Spremnost da se investira u održivije grejanje

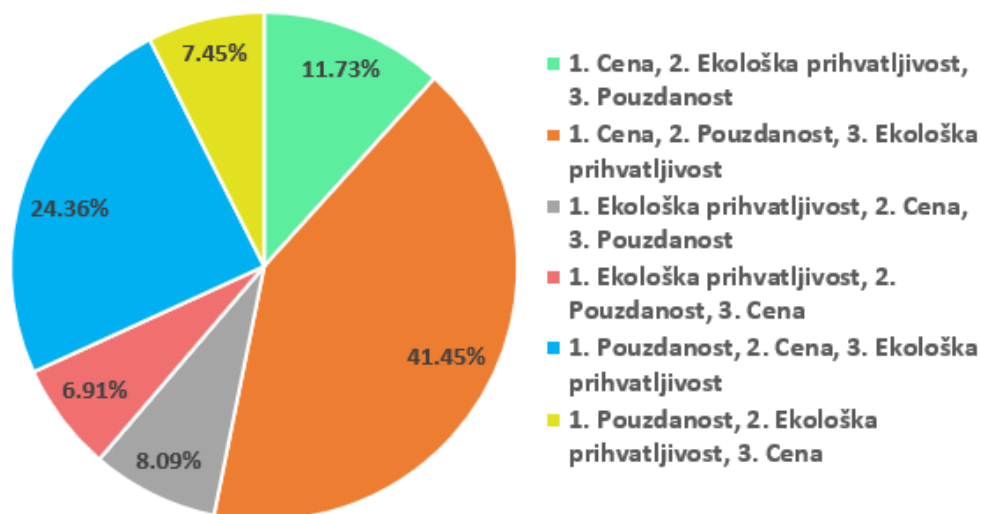
Kao mera podsticaja za zamenu trenutnih sistema grejanja, u anketi je razmatrana mera subvencije koja snižava prepreku nedostatka novca, identifikovanu kao najveću prepreku, i čini kupovinu novog sistema pristupačnijom. Odnos domaćinstva prema potencijalnoj subvenciji lokalne ili republičke vlasti za zamenu postojećeg sistema grejanja i kupovinu efikasnijeg sistema (npr. sistema na pelet, prirodni gas ili toplotne pumpe) analiziran je kroz voljnost domaćinstva da prihvati subvenciju od 10% do 50% od ukupne cene novog sistema grejanja. Rezultati su prikazani na Slici 35. Kategorija domaćinstava označena sa „već poseduje održivije grejanje“ obuhvata domaćinstva koja su se izjasnila da imaju sistem ne stariji od 4 godine koji se bazira na toplotnoj pumpi ili grejanju na pelet.



Slika 35. Subvencija koja bi motivisala domaćinstvo da zameni postojeći sistem grejanja

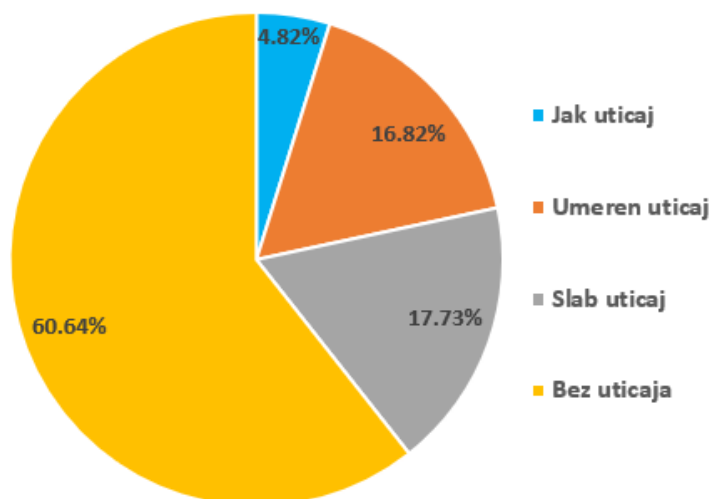
Rang prioriteta kod izbora načina grejanja prikazan je na Slici 36. Cena grejanja, kao kriterijum, ubedljivo je najvažniji za 53,18% domaćinstava. Pouzdanost sistema je na drugom mestu po važnosti (31,82%). Pouzdanost se u ovom kontekstu ogleda u verovatnoći da će određeni sistem grejanja izvršavati zahtevanu funkciju u određenom periodu bez zastoja. Pouzdanost se takođe odnosi i na pogodnosti koje određeni sistem ima u pogledu korišćenja i održavanja u odnosu na druge sisteme

(Pokorni, 2005). Ekološku prihvatljivost, kao najveći prioritet kod izbora načina grejanja, označilo je 15% domaćinstava. Ekološka prihvatljivost se odnosi na nivo uticaja koji određeni sistem grejanja ima na zagađenje životne sredine, klimatske promene i (ne)održivo korišćenje prirodnih resursa, u poređenju sa drugim sistemima.



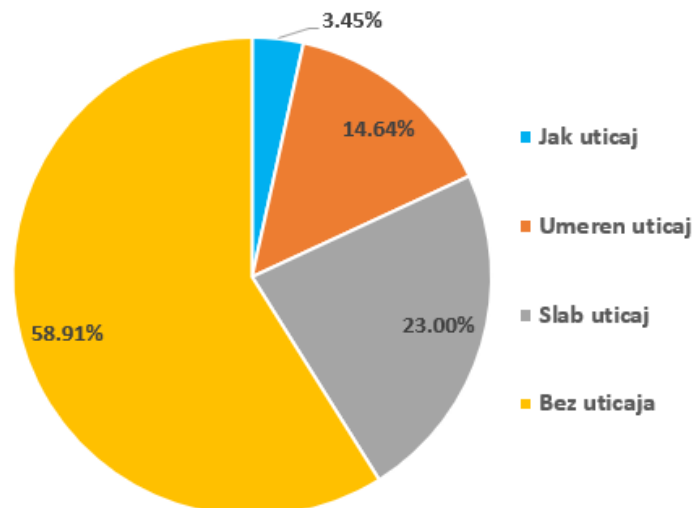
Slika 36. Rang prioriteta kod izbora grejanja

Kroz anketu je razmatrano i pitanje u kojoj meri okruženje (npr. komšiluk, porodica, poznanici) utiče na izbor grejanja domaćinstva (Slika 37). Najveći deo domaćinstava, tačnije 60,64%, se izjasnilo da okruženje nema uticaja na njihov izbor grejanja. Preostalih 39,46% domaćinstava izjasnilo se da okruženje u određenoj meri (slabo, umereno, jako) ima uticaj na izbor grejanja.



Slika 37. Uticaj okruženja na izbor načina grejanja domaćinstva

Stav domaćinstava prema zagađenju vazduha u grejnoj sezoni analiziran je preko ocene uticaja medija, tj. vesti o zagađenju, na način grejanja domaćinstava (Slika 38). Veći deo domaćinstava (58.91%) deli stav da ove vesti nemaju uticaja na njihov način grejanja, dok preostalih 41,09% domaćinstava konstatuje da informacije o zagađenju u određenoj meri (slabo, umereno, jako) utiču na njihov izbor grejanja.



Slika 38. Uticaj informacija o zagađenju vazduha na izbor načina grejanja domaćinstva

#### 5.4.4. Analiza rezultata istraživanja

Da bi se osigurao optimalan odgovor na izazove i rizike energetske tranzicije, kao i bilo kog drugog prirodnog, društvenog, tehničkog procesa, potrebno je obaviti istraživanje i sakupiti empirijske podatke. Na taj način, sakupljeni podaci garantuju određeni nivo pouzdanosti, objektivnosti i sistematičnosti. Metodom anketiranja su prikupljeni prethodno prikazani podaci o trenutnoj situaciji sa grejanjem u sektoru domaćinstva u Srbiji. Takođe, sprovedena anketa imala je za cilj postizanje višeg nivoa razumevanja pitanja vezanih za tranziciju grejanja ka održivijim sistemima grejanja, odnosno sistemima koji imaju veću zastupljenost obnovljivih izvora energije, veću efikasnost, dugoročnu isplativost i manje negativnog uticaja na životnu sredinu.

Sveukupni nalazi sugerišu da su najviše zastupljeni tehnološki zastareli sistemi grejanja, pre svega na ogrevno drvo, zatim da su u proteklom periodu sprovedene skromne investicije u osavremenjavanje grejanja i u mere povećanja energetske efikasnosti stambenih objekata, kao i da je prisutan nizak nivo svesti o vlastitom uticaju na zagađenje vazduha i održivom korišćenju prirodnih resursa.

Visok udeo zastarelih lokalnih sistema grejanja na ogrevno drvo (peći i šporeti - blizu 46%), u korelaciji je i sa životnim standardom i ograničenim finansijskim mogućnostima domaćinstava. U anketi, 58% domaćinstava je izjavilo da je nedostatak novca glavna prepreka za zamenu sistema grejanja. Od tog broja domaćinstava, najveći deo njih (preko 64%) poseduje sisteme grejanja koji su bazirani na ogrevnom drvetu. Kako su lokalna grejna tela na čvrsta goriva i dalje najjeftinija opcija na tržištu, ovakva struktura je sasvim očekivana.

Značajan udeo zastarelih tehnologija delom je posledica i slabe zainteresovanosti domaćinstava za kriterijum ekološke prihvatljivosti grejanja. Samo 15% domaćinstava je navelo na prvom mestu ekološku prihvatljivost kao prioritet kod izbora načina grejanja. Istovremeno, blizu 66% domaćinstava je ekološku prihvatljivost postavilo na poslednje mestu po rangui prioriteta.

Ogrevno drvo je ujedno i najzastupljeniji obnovljivi izvor energije koji se koristi za grejanje, sa udelom od oko 58% u domaćinstvima sa individualnim sistemima grejanja. Ogrevno drvo koje se koristi potiče iz domaćih resursa (Glavonjić, 2017), međutim njegovo neefikasno korišćenje u prethodno pomenutim lokalnim grejnim telima ugrožava održivo raspolaganje ovim domaćim i obnovljivim resursom. Osim toga, zastarele tehnologije i način i oblik korišćenja ogrevnog drveta uzrokuju visoke emisije ugljen-monoksida (CO), oksida azota (NOx), pepela i suspendovanih čestica (PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>) (Živković i dr., 2016).



Kao moderniji i efikasniji način korišćenja drvne biomase, u poslednjih par decenija je zabeležen porast u korišćenju sistema grejanja koji su bazirani na peletu (Glavonjić, 2017). Sisteme na pelet u poređenju sa sistemima na ogrevno drvo karakteriše veća efikasnost, konstantniji uslovi sagorevanja i manji uticaj na lokalno zagađenje vazduha. Međutim, iako je u porastu, blizu 7% domaćinstava sa individualnim sistemima grejanja koristi pelet za grejanje, što je i dalje relativno mali udeo u ukupnoj strukturi domaćinstava.

Električna energija je na drugom mestu po zastupljenosti kao energent za grejanje. U domaćinstvima sa individualnim sistemima grejanja, konvencionalne sisteme grejanja na električnu energiju (najčešće el. peći, grejalice i kotlovi) koristi 15,8% domaćinstava. Cene po kojima javno preduzeće (JP) Elektroprivreda Srbije (EPS) prodaje električnu energiju krajnjim kupcima na garantovanom snabdevanju, odnosno domaćinstvima, su regulisane. Trenutna cena električne energije za domaćinstva u Srbiji je jedna od najnižih u celoj Evropi (Eurostat, 2022c). Proizvodnja električne energije je velikim delom zasnovana na više od 30 godina starim termoelektranama na lignit. Oko 70% proizvodnje potiče iz termoelektrana, a preostali deo je iz OIE, pre svega iz hidroenergije (RZS, 2019). Iz ovog razloga, korišćenje električne energije za grejanje, pre svega kroz konvencionalne sisteme grejanja, sa sobom povlači emisije ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>) i zagađujućih materija iz termoelektrana. Kada je reč o efikasnijim sistemima grejanja na električnu energiju, kao što su toplotne pumpe, prema anketi njihov udeo je oko 0,7%.

Sistemi grejanja koji se baziraju na prirodnom gasu kao energentu nalaze se na trećem mestu po brojnosti sa udelom od 12,2%. Neki od razloga manje zastupljenosti prirodnog gasa u domaćinstvima sa individualnim sistemima jesu cena priključka za nove korisnike i nedovoljno razvijena gasna infrastruktura u nekim delovima države (AERS, 2021).

Prema anketi, ugalj kao energent koristi se u 5,45% domaćinstava. Ostali energenti se nalaze u delu manjem od 1% u populaciji domaćinstava sa individualnim grejanjem.

Kada je u pitanju starost sistema, gotovo trećina sistema (32,9%) u domaćinstvima su stariji od 15 godina, a oko 20% sistema su stariji od 20 godina. Kako je prosečan vek upotrebe sistema grejanja oko 20 godina (Michelsen i Madlener, 2016), podaci dobijeni u anketi ukazuju da je trećina sistema na kraju životnog veka i da ih je uskoro potrebno zameniti za nove. Međutim, usled nedostatka novca kao glavne prepreke, može se očekivati da će značajan deo ovih sistema biti u upotrebi i posle navršanih 20 godina korišćenja.

Još jedan argument u prilog tvrdnji da su postojeći sistemi u domaćinstvima tehnološki zastareli (Moon i Han, 2011) jeste činjenica da oko 49% sistema nema nijedan vid regulacije temperature (termostat). Ovde pre svega spadaju peći i šporeti koji se baziraju na uglju i ogrevnom drvetu kao energentima. Još jedna odlika zastarelosti sistema (MERP, 2017) jeste i podatak da oko 51% domaćinstava koja koriste čvrsta goriva, sistem grejanja koriste i za kuvanje u domaćinstvu.

Termoizolacija objekata smanjuje potrošnju toplotne energije za grejanje prostora i samim tim obezbeđuje uštedu energije (HERON, 2015). Prema rezultatima ankete, u poslednjih 10 godina, oko 44,6% domaćinstava nije sproveo ni jednu od mera izolacija niti zamenu stolarije. Prepreka nedostatka novca je, kao i u slučaju zamene zastarelih sistema grejanja, glavni uzročnik malog broja investicija u termoizolaciju objekata. Kada su u pitanju domaćinstva koja su sprovele mere energetske efikasnosti objekata, može se videti iz strukture da se ova domaćinstva češće greju na sisteme na prirodni gas (oko 18,4%) i pelet (oko 11,3%), nego što je to slučaj u ukupnoj analiziranoj populaciji, što ukazuje da ova domaćinstva češće poseduje efikasnije sisteme grejanja.

Prepreka nedostatka finansijskih sredstava da se investira u efikasnije grejanje se najviše ističe od strane domaćinstava i kao takva, ova prepreka može dosta uticati na ishod energetske tranzicije. Ako nedostatak finansijskih sredstava posmatramo u širem kontekstu, u nacionalnoj statistici se uočava da je oko 23% stanovništva u Srbiji u riziku od siromaštva, a da je prosečna neto zarada u januaru iznosila 600 evra (€), a medijana oko 450 €, što znači da 50% zaposlenih ostvaruje zaradu do ovog iznosa (RZS, 2022c). U takvim okolnostima, veće investicije, u kakve spada i kupovina savremenih

održivijih sistema grejanja, nisu priuštive u meri u kojoj su u npr. razvijenim zemljama EU. Nivo ekonomskog razvoja Srbije, identifikovane prepreke i strukturu sistema grejanja lakše je postaviti u korelaciju sa stanjem u državama u regionu Zapadnog Balkana i potpisnicama Ugovora o Energetskoj zajednici.

Velika zastupljenost sistema grejanja baziranih na ogrevnom drvetu može se takođe objasniti i ignorisanjem niske efikasnosti ovih sistema, kao i ignorisanjem pratećeg lokalnog zagađenja koje ovi sistemi proizvode (Glavonjić, 2011). Naime, oko 25% domaćinstava ima peći i šporete na ogrevno drvo koji nisu stariji od 4 godine, što znači da su ovi sistemi grejanja i dalje popularni i da u njih stanovništvo ima poverenje. Ovi podaci su argument da, osim finansijskih, prisutne su i druge prepreke, u većoj ili manjoj meri. Oko 25,5% domaćinstava navodi da je nezainteresovano da menja trenutni sistem iz privatnih razloga, dakle ne navodeći jednu od prepoznatih prepreka.

Nezainteresovanost, kao prepreka energetske tranziciji, jeste opšteg karaktera, ali neka od obrazloženja domaćinstava ukazuju da je mogući izvući neke konkretnije uzroke. Jedan od njih jeste starost članova domaćinstva, koji su zbog toga manje zainteresovani za investicije čiji period otplate je 5, 10 ili 15 godina. S obzirom da je oko 1/5 populacije u Srbiji starija od 65 godina (RZS, 2021b), značajno je prepoznati ovu činjenicu kod analize prirode prepreka. Drugi važan uzrok nezainteresovanosti za napuštanjem ogrevnog drveta, posebno u nekim delovima Srbije, jeste i posedovanje šuma u svojini, što domaćinstva navodi na zadržavanje sistema grejanja koji se bazira na sagorevanju ogrevnog drveta. Treći uzrok nezainteresovanosti dela domaćinstava treba tražiti i u činjenici da jedan deo domaćinstava ima i podstanarski status, usled čega nema želju da ulaže u objekat stanovanja koji nije u njihovom vlasništvu, a zakonski vlasnici nisu uvek motivisani za veće kapitalne investicije u prostor koji daju u zakup.

Nedostatak informacija o održivijem grejanju prepoznalo je kao prepreku 9% domaćinstava. Ta prepreka se pre svega odnosi na neinformisanost domaćinstava o učinku i prednostima modernijih sistema, koji su i dalje slabo zastupljeni u populaciji, te ih prosečni korisnici doživljavaju kao teškim za razumevanje i korišćenje (Michelsen i Madlener, 2016). Nepoverenje u nove tehnologije, manjak znanja i interesovanja su često čvrsti uzročnici za status quo (HERON, 2015). U prilog ovom nalazu govori i podatak da, prema poslednjem Popisu stanovništva, 13,7% stanovništva nema završeno osnovno obrazovanje, a 20,8% stanovništva poseduje samo osnovnu školu. Veći deo tog stanovništva je u ruralnim krajevima i najčešće je oslonjen na tradicionalne vidove korišćenja ogrevnog drveta za grejanje i kuvanje.

Nedovoljno angažovanje donosilaca odluka na lokalnom i republičkom nivou (nosioci vlasti) u sprovođenju energetske tranzicije ka održivijem grejanju prepoznalo je 5,5% domaćinstava kao glavnu prepreku. Ta prepreka se ogleda pre svega u ograničenim kapacitetima i resursima, nedostatku vizionarstva, ali i nevoljnosti da se preuzimaju mere koje se mogu tumačiti kao nepopularne ili kao mere koje ne donose direktnu političku korist.

Kada je u pitanju perspektiva za energetske tranzicije koja se oslanja isključivo na potencijal koji se nalazi u samim domaćinstvima da u budućnosti zamene postojeće dotrajale sisteme, blizu 40% domaćinstava bi bilo spremno da investira od 10% do 50% više u odnosu na najjeftiniju opciju na tržištu. Sa druge strane, oko 60% domaćinstava se izjasnilo da nije spremno da za novi sistem investira više. Ovaj broj je blizak broju domaćinstava koja su kao najveću prepreku navela nedostatak finansijskih sredstava.

Potencijalni pokretači za masovnu i ubranu tranziciju ka održivijem grejanju tema su brojnih međunarodnih studija. Politički intervencionizam je nešto što se analizira na različitim nivoima (međunarodnim, nacionalnim, lokalnim) i kroz različite političke instrumente. Tri često analizirana instrumenta u literaturi su zabrane (restrikcije) određenih zastarelih tehnologija i energenata kao što su ugaj i ogrevno drvo, ekološke takse (porezi) za zagađivača i subvencije za kupovinu efikasnijih i ekološki prihvatljivijih alternativa (Frankowski and Herrero, 2021), (Kelly et al., 2020).

Kao instrument ili mera energetske politike koja ima za cilj da smanji prepreku nedostatka novca za zamenu sistema, tj. kao mera koja pre ima za cilj podsticanje, a ne oporezivanje ili zabranu, u anketi je razmatran odnos domaćinstava prema subvenciji. Dobijeni rezultati sugerišu da bi eventualne subvencije za zamenu postojećih sistema za efikasnije sisteme grejanja bile značajan pokretač kod dela populacije. Skoro 50% domaćinstava bi bilo spremno da investira u zamenu sistema kada bi im država pomogla pri kupovinu sa subvencijom 10-50%. Oko 6,6% domaćinstava bi bilo spremno kada bi subvencije bile veće od 50% troškova. Udeo domaćinstava koja ne bi prihvatila subvencije za zamenu postojećeg sistema za efikasniji i održiviji je oko 40%. Ovi podaci još jednom ukazuju da, premda je nedostatak finansijskih sredstava glavna prepreka, subvencija ne bi bila dovoljna mera energetske politike za masovnu i bržu energetska tranziciju u državi.

## 6. MODEL ENERGETSKE TRANZICIJE U GREJANJU DOMAĆINSTAVA ZASNOVAN NA AGENTIMA (ABM)

Izboru i implementaciji političkih instrumenata za podršku energetske tranzicije treba da prethodi procena pojedinačnih instrumenata i njihovih pozitivnih i eventualno negativnih posledica. Domen političkih instrumenata odnosi se na krug aktuelnih pitanja sa kojima se suočava energetika u 21. veku - povećanje energetske efikasnosti, priuštivost energije, sigurnost snabdevanja, smanjenje uticaja na klimatske promene, očuvanje ili održivo korišćenje prirodnih resursa i smanjenje zagađenja životne sredine (Doukas i dr., 2008), (Jaeger i Machry, 2014). Uspešnost energetske tranzicije u tom smislu ogledaće se pre svega u uspešnom odgovoru energetske politike i njenih instrumenata na ova pitanja.

Za podršku energetske planiranju i analizi efekata različitih instrumenata energetske politike na energetske tranzicije u domaćinstvima do 2050. godine definisan je model baziran na agentima (ABM model) (Pavlović i dr., 2022). Kako je u Poglavlju 4 elaborirano, ovakav metodološki pristup modeliranju obezbeđuje da se energetska tranzicija analizira na tzv. mikro nivou, odnosno nivou pojedinaca, koji donose odluke o načinu grejanja na osnovu ličnih stavova, uticaja okruženja, finansijskih mogućnosti, lokacijskih uslova i sl. Ovaj pristup omogućava da se promene ocenjuju tokom celog procesa (Hansen i dr., 2019), (Knobloch, 2021), dakle ne samo krajnji efekat tranzicije nakon 20 ili 30 godina. Na taj način, model može da analizira tzv. difuziju tehnologija u populaciji i stepen ekspanzije (Smaldino i dr., 2017), posebno kada su u pitanju savremeni načini grejanja, kao što su npr. toplotne pumpe.

### 6.1. ABM simulacioni model

Kao softverska platforma za razvoj modela korišćen je softver NetLogo 6.1.1 (Wilensky, 1999). Ovaj softver omogućava kodiranje pomoću programskog jezika „NetLogo“ i alate za vizuelizaciju i izvršavanje programskog koda. Softver je besplatan i otvoren (*engl.* Open-source software) u svrhu obrazovanja i istraživanja.

ABM model za simulaciju energetske tranzicije u grejanju fokusiran je na individualne entitete, odnosno domaćinstva koja se greju pomoću individualnih sistema grejanja. Ovakav pristup, u literaturi poznat je i kao „bottom-up“ (odozdo na gore), tretira sva domaćinstva kao posebne potrošače i usmeren je na ispitivanje njih i njihovog ponašanja i navika, a ne na proizvodnju i ponudu energije. U ovom konkretnom slučaju, ABM model simulira ponašanje domaćinstava u cilju ispitivanja posledica pojedinačnog ponašanja i donošenja odluka na društvenu dinamiku (Rieder, 2003), kao i efekata različitih političkih instrumenata na odluke domaćinstava u vezi sa grejanjem.

U metodološkom smislu, svaki simulacioni ABM model sastoji se od određenih delova i treba da odgovori na određeni broj pitanja koja se tiču sadržaja, obima i samog cilja modeliranja. Tabela 6 prikazuje osnovne delove predloženog ABM modela za simulaciju energetske tranzicije i njihov opis.

Tabela 6. Opis ABM modela

Osnovni delovi modela	Opis
Definisanje problema	<p>ABM model analizira ključne činioce u zadovoljenju dugoročnih potreba za grejanjem domaćinstva.</p> <p>Model treba da pruži odgovor na sledeća pitanja:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Kako će izgledati energetska tranzicija u grejanju domaćinstava do 2050. godine, tj. kakva će biti struktura sistema grejanja i koji su dominantni sistemi grejanja i energenti?</li> <li>– Koji instrumenti energetske politike najviše doprinose masovnijoj zastupljenosti održivijeg grejanja?</li> <li>– Kako instrumenti utiču na lokalne emisije CO<sub>2</sub>, CO i NO<sub>x</sub>?</li> </ul>
Tip agenta	Domaćinstvo sa individualnim sistemom grejanja
Karakteristike agenta (Ulazni parametri)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tip naselja (ekstra-urbano/urbano/ruralno)</li> <li>– Grejna površina (m<sup>2</sup>)</li> <li>– Glavni energent</li> <li>– Tip sistema grejanja</li> <li>– Efikasnost sistema grejanja</li> <li>– Starost sistema grejanja</li> <li>– Potrošnja energenta (kWh/god.)</li> <li>– Korisna toplota (kWh/god.)</li> <li>– Emisija CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, i CO (kg/god.)</li> <li>– Finansijsko stanje</li> <li>– Nezainteresovanost za zamenom trenutnog načina grejanja</li> <li>– Spremnost za prihvatanje subvencije</li> <li>– Uticaj okruženja</li> </ul>
Aktivnosti agenta	Domaćinstvo odlučuje o načinu grejanja u cilju zadovoljenja dugoročne potrebe za termalnim komforom tokom grejne sezone (oktobar-april).
Spoljna sredina (Ulazni parametri)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cene sistema grejanja</li> <li>– Cene energenata</li> <li>– Instrumenti energetske politike</li> <li>– Socijalna mreža/okruženje</li> </ul>
Izlazni parametri	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Udeo održivih i modernih sistema grejanja u ukupnoj populaciji</li> <li>– Struktura domaćinstava prema načinu grejanja</li> <li>– Emisija CO<sub>2</sub></li> <li>– Emisija NO<sub>x</sub> i CO</li> </ul>
Vremenski okvir	Vremenski okvir simulacije je 30 godina (tj. do 2050. godine) i podeljen je na vremenske intervale po jednu godinu (jedna grejna sezona).

Pregled korišćenih izvora i baza podataka za ulazne parametre u model prikazan je u Tabeli 7.

Tabela 7. Izvori podataka

<b>Ulazni podaci</b>	<b>Izvori</b>
Tip naselja; Grejna površina.	Istraživanje o grejanju domaćinstava (Pavlović i dr., 2021)
Energent; Tip sistema grejanja; Starost sistema; Godišnja potrošnja.	Istraživanje o grejanju domaćinstava (Pavlović i dr., 2021)
Spremnost da se plati više za održivije grejanje; Nezainteresovanost da se menja trenutni način grejanja; Spremnost da se uzme subvencija za zamenu sistema; Uticaj okruženja.	Istraživanje o grejanju domaćinstava (Pavlović i dr., 2021)
Cene sistema	Prodajni katalozi (Etaž, 2021), (Magnotron, 2021), (GS, 2021)
Efikasnost sistema	(AERS, 2020), (Dincer, 2021)
Cene energenata	(AERS, 2020)
Emisioni faktori	Registar emisija (EEA, 2019)
Instrumenti energetske politike	Pretpostavke bazirane na (EC, 2020c), (Karpinska i Šmiech, 2021), (Rosenow i dr., 2017)

Ulazni podaci za domaćinstva su predstavljeni numerički u modelu. Svaka numerička oznaka predstavlja specifičan kod kojim se karakteriše tip naselja, grejna površina, energent koji se trenutno koristi za grejanje u domaćinstvu, stavovi domaćinstva prema zameni sistema, subvenciji, odnos prema okruženju i sl. Pre učitavanja, odnosno pozivanja ulaznih podataka u model, oni se pripremaju u posebnoj tekstualnoj datoteci („.txt“ fajl) za 1.100 ulaznih domaćinstava u model.

Ulazni podatak (parametar) „tip naselja“ primarno ograničava koje sisteme grejanja domaćinstvo može da instalira, odnosno za koje sisteme postoje lokacijski uslovi. U tom smislu, domaćinstva su podeljena u tri tipa naselja: ekstra urbano (kod „11“), urbano (kod „1“) i ruralno (kod „2“). U prvom tipu naselja (ekstra urbano), grupisana su domaćinstva kod kojih ne postoje uslovi za instalaciju sistema grejanja koji podrazumevaju sagorevanje čvrstih goriva u domaćinstvu. U domaćinstvima koja su grupisana u dva druga tipa naselja, nema ograničenja u smislu izbora sistema grejanja.

„Grejna površina“, kao ulazni parametar, predefiniše sistem grejanja koji je odgovarajući za domaćinstvo prema nominalnoj snazi samog uređaja. Sva domaćinstva u modelu grupisana su u tri

kategorije prema površini domaćinstva koja se greje: domaćinstva kojima odgovaraju sistemi grejanja za prostor do 50 m<sup>2</sup> (kod „1“), domaćinstva kojima su potrebni sistemi za grejanje prostora od 50 m<sup>2</sup> do 100 m<sup>2</sup> (kod „2“), i domaćinstva kojima su potrebni sistemi za prostor preko 100m<sup>2</sup> (kod „3“).

Parametar “Energent” definiše koji energent domaćinstvo dominantno koristi pomoću trenutnog sistema grejanja, npr. ogrevno drvo pomoću šporeta ili peći, električnu energiju pomoću električnog kotla itd. Kodne oznake za energente su sledeće:

- Ogrevno drvo – 1;
- El. energija – 2;
- Prirodni gas – 3;
- Pelet – 4;
- Ugalj – 5;
- Toplotna pumpa na OIE i el. energiju – 6;
- Poljoprivredna biomasa – 7.

Ulazni parametar “Spremnost da se plati više za održivije grejanje” izražen je u procentima (%), 0 – 100% (tj. od 0 do 1) i predstavlja dodatna finansijska sredstva koje je domaćinstvo spremno da izdvoji u odnosu na najjeftinije opcije na tržištu da uvede održivije grejanje. U prikazanom modelu, koji za predmet ima analizu i projektovanje energetske tranzicije u Srbiji, kao održiviji sistemi grejanja razmatrani su sistemi na pelet i toplotne pumpe, kao sistemi koji su u odnosu na druge komercijalne opcije na tržištu efikasniji, ekološki prihvatljiviji, bazirani što više na obnovljivim izvorima energije i koji, u slučaju toplotne pumpe, podstiču održivu elektrifikaciju grejanja (Simon, 2021). Druge održive alternative grejanja, kao npr. solarno grejanje, nisu razmatrane u modelu pošto njihova upotreba nije registrovana kroz anketu kao dominantan način grejanja. Osim što su trenutno marginalni u populaciji, sistemi grejanja bazirani na solarnoj energiji teško mogu da zadovolje autonomiju grejanja u zimskim mesecima u Srbiji, odnosno kontinentalnom delu Zapadnog Balkana.

„Nezainteresovanost da se menja trenutni način grejanja“ predstavlja ulazni parametar (kodna oznaka „1“) kojim se karakterišu domaćinstva u populaciji koja su zadovoljna trenutnim načinom grejanja i ne žele da ga menjaju ni pod kojim uslovima. Pretpostavka od koje se pošlo u kreiranju ovog parametra jeste da će kod izvesnog dela populacije, bez obzira na spoljne uticaje, ostati opredeljenost za postojeći način grejanja zbog poverenja, navika ili npr. posedovanja vlastite šume, u slučaju grejanja na ogrevno drvo. Sa druge strane, kada je reč o odnosu domaćinstava prema subvencijama za kupovinu efikasnijih sistema, to je definisano pomoću ulaznog parametra „Spremnost da se uzme subvencija za zamenu sistema“. Ovaj parametar je, kao i parametar vezan za spremnost da se investira, izražen procentualno (%).

„Uticaj okruženja“ je ulazni parametar u model kojim se kvantitativno karakteriše percepcija domaćinstva o uticaju okoline na izbor načina grejanja domaćinstva. Ukoliko domaćinstvo smatra da okruženje nema uticaja, imaće kodnu oznaku „0“, ukoliko smatra da postoji slab uticaj okruženja, imaće oznaku „1“, ukoliko smatra da postoji umeren uticaj, imaće oznaku „2“, a ukoliko smatra da je jak uticaj okruženja, imaće oznaku „3“. Ovaj parametar je takođe preuzet iz rezultata ankete domaćinstava i njegova uloga će detaljnije biti objašnjena u nastavku.

Kada su u pitanju ulazni parametri za sisteme grejanja (cena sistema, efikasnost sistema, cena energenata, emisioni faktori), njihove vrednosti su prikazane u Tabeli 8. Model uključuje sisteme grejanja koji su najzastupljeniji na tržištu i koji su trenutno zastupljeni u više od 0,5% domaćinstava sa individualnim grejanjem u uzorku ankete. Pretpostavka je da su ovi sistemi grejanja ili sistemi koji su njima sličnih karakteristika najverovatnija opcija prilikom kupovine novog sistema grejanja. Sistemi grejanja su označenim kodnim vrednostima prema energentu i grejnoj površini, koja treba da oslikava njihovu približnu snagu.

Tabela 8. Ulazni parametri za sisteme grejanja

Energent	Cene sistema (€) (Etaž, 2021), (GS, 2021), (Magnotron, 2021)		Kod sistema	Cene energenta (€/kWh) (AERS, 2020)	Efikasnost transformacije u toplotnu energiju (AERS, 2020), (Dincer, 2021)	Emisioni faktori (g/kWh) (EEA, 2019)
Ogrevno drvo	Do 50 m <sup>2</sup>	200	„11“	0,024	55%	CO <sub>2</sub> – 0; NO <sub>x</sub> – 0,18; CO – 14,4
	50 do 100 m <sup>2</sup>	400	„12“			
	Preko 100 m <sup>2</sup>	700	„13“			
El. energija	Do 50 m <sup>2</sup>	320	„21“	0,06 0,12	100%	N/A
	50 do 100 m <sup>2</sup>	390	„22“			
	Preko 100 m <sup>2</sup>	460	„23“			
Prirodni gas	Do 50 m <sup>2</sup>	350+470 <sup>3</sup>	„31“	0,035	90%	CO <sub>2</sub> – 201; NO <sub>x</sub> – 0,21; CO – 0,06
	50 do 100 m <sup>2</sup>	400+470	„32“			
	Preko 100 m <sup>2</sup>	470+470	„33“			
Pelet	Do 50 m <sup>2</sup>	570	„41“	0,043	80%	CO <sub>2</sub> – 0; NO <sub>x</sub> – 0,29; CO – 1,08
	50 do 100 m <sup>2</sup>	700	„42“			
	Preko 100 m <sup>2</sup>	900	„43“			
Ugalj	Do 50 m <sup>2</sup>	280	„51“	0,025	55%	CO <sub>2</sub> – 371; NO <sub>x</sub> – 0,27; CO – 5,4
	50 do 100 m <sup>2</sup>	560	„52“			
	Preko 100 m <sup>2</sup>	700	„53“			
Topl. pumpa (OIE +el. en.)	Do 50 m <sup>2</sup>	1600	„61“	0,12	COP = 3	N/A
	50 do 100 m <sup>2</sup>	2400	„62“			
	Preko 100 m <sup>2</sup>	3000	„63“			

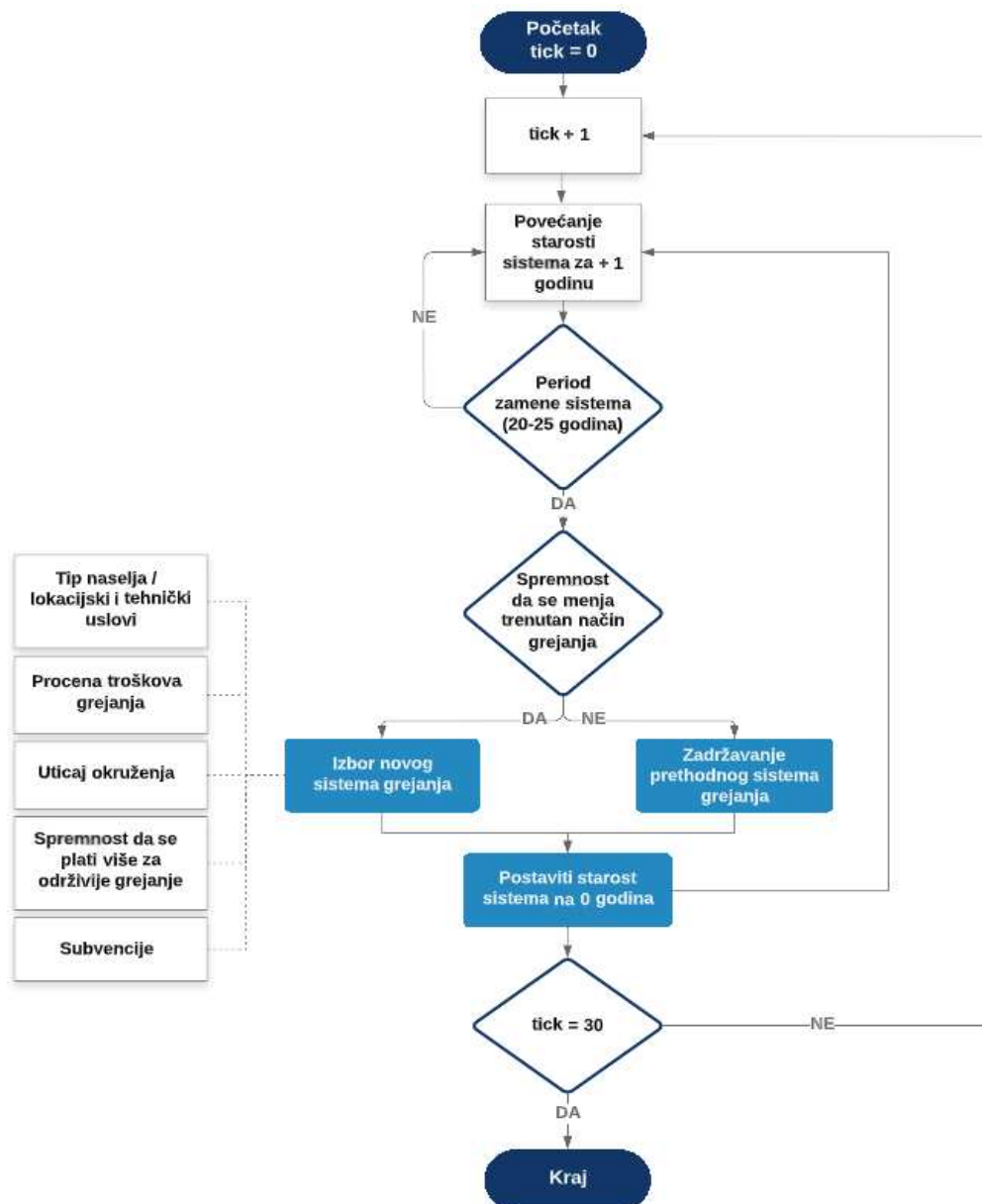
Dijagram toka simulacije po kome model izvršava zadati programski kod prikazan je na Slici 36. Inicijalni pokretač za kupovinu novog sistema grejanja u domaćinstvu je dotrajalost sistema (kraj životnog veka proizvoda). Životni vek sistema grejanja je okvirno 20 godina (Michelsen i Madlener, 2016). S obzirom da je nešto više od 1/5 individualnih sistema grejanja u domaćinstvima u Srbiji stariji od 20 godina (Pavlović i dr., 2021), u modelu je predviđeno da će domaćinstva menjati sistem grejanja nasumično u intervalu 20-25 godina starosti sistema.

Model razmatra energetska tranziciju od 2020-2050. godine, odnosno period od 30 godina ili 30 grejnih sezona. Na početku svake grejne sezone<sup>4</sup>, kao što se vidi na Slici 39, domaćinstvo kome je istekao životni vek trenutnog sistema grejanja posmatra svoje okruženje i tržište, i na osnovu vlastitih potreba, lokacijskih uslova, stavova, finansijskih mogućnosti i sl. kupuje novi sistem grejanja. Na ovaj način, model je predvideo interakcije između domaćinstva i sredine, ali i između domaćinstava (agenata) međusobno.

<sup>3</sup> Dodatni troškovi za priključak za gas = 470 EUR

<sup>4</sup> Vremenski interval u modelu je jedna grejna sezona. Označen je engleskom jeziku rečju „tick“ (na srpskom: otkucaj).





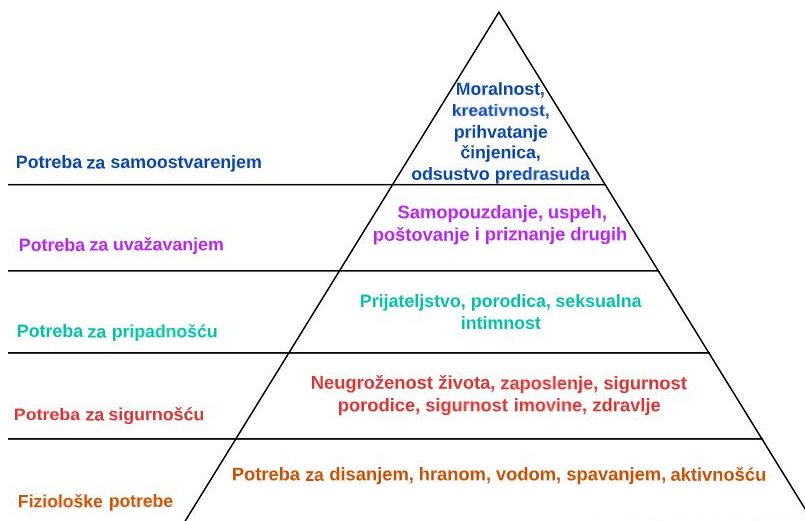
Slika 39. Dijagram toka ABM modela

S obzirom da simulacioni model poseduje izvesnu meru stohastičnosti, preporuka je da se prilikom korišćenja ovakvih modela izvrši veći broj simulacija da bi se dobio reprezentativniji rezultat (Lee J. i dr., 2015). U konkretnom slučaju, rezultati modela energetske tranzicije grejanja domaćinstava u Srbiji formirani su na osnovu 30 simulacija u NetLogo-u za svaki od razmatranih slučajeva i scenarija. Svaka simulacija je ograničena na 30 vremenskih intervala (otkucaja), odnosno grejnih sezona, do 2050. godine. Izabrani period od 30 godina u saglasnosti je sa praksom u energetskom modeliranju energetske tranzicije i energetske politike na nivou EU i proklamovane strategije klimatske neutralnosti. (EC, 2019a).

## 6.2. Proces donošenja odluke

Svako domaćinstvo nužno teži da obezbedi grejanje u zimskom periodu da bi obezbedilo osnovne uslove za život usled niskih spoljnih temperatura. Potreba za grejanjem domaćinstva stoga se može okarakterisati kao jedna od osnovnih i neizbežnih potreba (Lee T. i dr., 2014) u uslovima kada to klimatski uslovi zahtevaju. U Maslovljevoj teoriji motivacije (Maslow, 1943), razvijen je teorijski pristup o ljudskim potrebama, poznat kao Maslovljeva hijerarhija ili piramida potreba, gde je ključna distinkcija između fizioloških potreba koje su primarne da se zadovolje (hrana, voda, spavanje) da bi

na red prioriteta došle i druge ljudske potrebe (kao što su prijateljstvo, priznanje drugih, kreativnost itd.) (Slika 40). Preslikavajući ovaj pristup u domen potreba domaćinstva, tj. članova domaćinstva, zadovoljenje potrebe za grejanjem, odnosno termalnim komforom, može se okarakterisati kao jedna od primarnih ljudskih potreba (Bartiaux, 2011). U tom smislu, prilikom donošenja odluka o načinu grejanja, glavni činioci koji utiču na izbor sistema grejanja su pre svega lokacijski i tehnički uslovi, materijalni uslovi, odnosno finansijski troškovi grejanja, i poverenje i zadovoljstvo trenutnim načinom grejanja.



Slika 40. Maslovljeva piramida ljudskih potreba (Bartiaux, 2011)

Osim ovih činilaca koji primarno utiču na izbor grejanja, globalni trendovi ukazuju da je u porastu i svest potrošača o uticaju na životnu sredinu, klimatske promene, održivi razvoj, očuvanje prirodnih resursa, efikasnije korišćenje energije i sl. Međutim, i pored porasta svesti o navedenim pitanjima, potrošaču ili kupcu bilo koje usluge ili proizvoda, pa tako i sistema grejanja, nije uvek jednostavno da uvaži sva ova pitanja i na njih uspešno odgovori. Tzv. „zeleni“, „ekološki“, ili „održivi“ sistemi grejanja koji se sreću u literaturi (Pratiwi i Pratomo, 2018), najčešće su skuplji od konvencionalnih, koju su duže i samim tim masovnije prisutni u populaciji (Pleeging i dr., 2021). To otežava ili onemogućava njihovu prihvatljivost za izvestan broj domaćinstava.

Spremnost da se plati (*engl.* Willingness to pay, akronim „WTP“) za održivije grejanje, samim tim i odnos prema pitanjima održivosti, životne sredine i klimatskih promena varira od regiona do regiona. Da bi se u model uvrstila spremnost pojedinih domaćinstava da investiraju više u održivije grejanje (ekološki i klimatski prihvatljivije, bazirano na OIE i energetske efikasnije), korišćeni su empirijski podaci dobijeni iz istraživanja grejanja u domaćinstvima. Dobijeni podaci ukazuju da postoji izvestan broj domaćinstava koja bi bila spremna da investiraju prilikom zamene postojećeg sistema, te je stoga ovaj ulazni parametar od značaja za projekciju energetske tranzicije do 2050. godine.

„Spremnost da se investira (ili plati) više“ može se definisati kao nivo novčanog doprinosa (maksimalne cene) koji je domaćinstvo spremno da izdvoji da bi postiglo određeni cilj (Stigka i dr., 2014), u konkretnom slučaju, dugoročno postizanje održivijeg grejanja (Kowalska-Pyzalska, 2017), (Karytsas, 2019), (Pleeging i dr., 2021). Simulacioni ABM model predviđa da se „Spremnost da se investira više“ računa kao dodatna vrednost koju su domaćinstva spremna da izdvoje za održivije grejanje u poređenju sa sistemima koji se baziraju na neefikasnom korišćenju električne energije i drvene biomase ili korišćenju fosilnih goriva za grejanje (Kim i dr., 2019).

Da bi se prethodni činioci uvažili i da bi se obezbedio praktičan, sistematičan i logičan pristup donošenju odluka u ABM modelu, proces donošenja odluke o načinu grejanja domaćinstva prikazan je u izrazu (2). Odluka domaćinstva o izboru novog sistema grejanja (D) predstavlja funkciju

finansijskih (cena sistema i energenta), tehničkih (potrošnja goriva tokom grejne sezone), socijalnih i ekoloških parametara (spremnost da se investira u održivije grejanje).

$$D = ((P_F \times C) + P_{HS}) \times WTP \quad (2)$$

gde je:

- D** - parametar donošenja odluke (€);
- P<sub>F</sub>** - cena energenta (EUR/kWh);
- C** - potrošnja energije tokom grejne sezone (kWh);
- P<sub>HS</sub>** - cena sistema grejanja (€);
- WTP** - spremnost da se plati više održivije grejanje.

Pre donošenja odluke o budućem načinu grejanja, svako domaćinstvo prema lokacijskim i tehničkim uslovima i grejnoj površini procenjuje pojedinačno dostupne sisteme grejanja na tržištu tako što ih poredi međusobno i teži da izabere sistem sa najnižim kapitalnim i operativnim troškovima (Prilog 1). Istovremeno, prilikom procene, u obzir će biti uzeta i spremnost domaćinstva (u meri u kojoj je prisutna) da više plati održivije sisteme grejanja. Na primer, ako je domaćinstvo spremno da plati 50% (WTP = 0,50) više za održivije sisteme grejanja, suma kapitalnih troškova i operativnih troškova u jednoj grejnoj sezoni biće smanjena za 50%, a ako domaćinstvo nije spremno da plati više, WTP neće uticati na sumu troškova (WTP=1).

S obzirom da ABM model simulira ponašanje krajnjih korisnika (domaćinstava) u domenu donošenja odluka o načinu grejanja narednih 30 godina, uvođenje tzv. socijalne dinamike u simulaciju dozvoljava opisivanje mehanizama koji utiču na promene stavova i ponašanja kroz vreme usled interakcija domaćinstava sa okruženjem (Jackson i dr., 2017). Kompleksnost društvenih promena ukazuje da ponašanje jedne grupe ili društva u celini nije prosta replika ponašanja pojedinaca koji čine tu grupu ili društvo (Irwin i Wang, 2017). Promene u ponašanju ne nastupaju istovremeno kod svih jedinki i ne ispoljavaju se identično (npr. neće sva domaćinstva u istoj meri u budućnosti biti spremna da investiraju više u održivije grejanje, kao što to nije slučaj ni sada). Ova činjenica je još jedan važan argument za primenu modeliranja baziranog na agentima u projekciji tranzicije grejanja kod domaćinstava. Uvođenjem tzv. socijalnog umrežavanja (*engl.* social networking) (Alvarez-Galvez, 2015), predloženi ABM model dobija dodatnu dimenziju i samu simulaciju čini bližu realnom svetu. U ABM modelu je predviđeno da će domaćinstva, ako se odluče za zamenu postojećeg sistema, u periodu pred njegovu zamenu, korigovati svoj WTP kroz interakciju sa drugim domaćinstvima.

Kako podaci o umreženosti agenata (u ovom slučaju domaćinstava) ne postoje, a i sama teorija i praksa modeliranja društvenih fenomena na nivou velikih populacija ne pruža dovoljno informacija i metodološki okvir, umrežavanja se najčešće prave kao nasumična (slučajna). Metoda umrežavanja poznata i kao tzv. „kreiranje malih svetova“ (Sopha, 2013), (Malik, 2017) definisana je u ovom modelu na taj način da se domaćinstva nasumično povezuju sa 4 do 8 domaćinstava iz populacije. Premise za ovakav način povezivanja jesu, prvo, da većina jedinki razmenjuje informacije u okviru manjih socijalnih mreža (poznatog i kao „efekat komšiluka“ (Sopha, 2013) koju čine komšije, prijatelji, kolege, familija i dr., a drugo, umrežavanje je potpuno slučajno (Irwin i Wang, 2017) i na taj način oslobođeno bilo kakvog „spoljašnjeg“ uticaja od strane kreatora modela.

Ulazni parametar za kvantifikovanje uticaja okruženja na domaćinstvo u modelu preuzet je iz rezultata ankete. Percepcija uticaja okruženja na domaćinstvo kod izbora grejanja u anketi je kvalitativno određena ocenama: jak, umeren, slab uticaj i bez uticaja. U poslednjem slučaju, kada domaćinstvo smatra da okruženje nema uticaj na izbor načina grejanja, parametar WTP (izražen u %) kod domaćinstva se neće menjati. U prva tri slučaja, kada domaćinstvo smatra da okruženje ima određeni uticaja na izbor načina grejanja, parametar WTP se menja pod uticajem socijalne mreže u

kojoj je domaćinstvo (Prilog 2). Ovakvim pristupom u definisanju uticaja okruženja na domaćinstva uključeno je prethodno saznanje i odnos domaćinstva prema održivijem grejanju (inicijalni WTP) i uticaj okruženja u meri u kojoj je domaćinstvo sklono da preuzme obrasce ponašanja iz okoline.

U prvom slučaju, kada domaćinstvo smatra da okruženje ima jak uticaj, inicijalni parametar WTP domaćinstva će se menjati prema sledećoj funkciji:

$$\begin{aligned} & \text{if else } WTP_0 > \min WTP_N & (3) \\ WTP_1 &= WTP_0 - (WTP_0 - (\min WTP_N)) \\ WTP_1 &= WTP_0 \end{aligned}$$

gde je:

**WTP<sub>0</sub>** - inicijalni WTP domaćinstva, preuzet iz ankete;

**minWTP<sub>N</sub>** - najmanja vrednost WTP koja je registrovana u mreži u kojoj se nalazi domaćinstvo, tj. najveća spremnost za investiranjem u obnovljivo grejanje među domaćinstvima koja su umrežena;

**WTP<sub>1</sub>** - ažurirana vrednost parametra WTP kod domaćinstva.

U slučaju kada domaćinstvo smatra da okruženje ima umeren uticaj, inicijalni WTP će se menjati prema sledećoj funkciji:

$$\begin{aligned} & \text{if else } WTP_0 > \min WTP_N & (4) \\ WTP_1 &= WTP_0 - \left( \frac{WTP_0 - (\min WTP_N)}{2} \right) \\ WTP_1 &= WTP_0 \end{aligned}$$

U slučaju kada domaćinstvo smatra da postoji slab uticaj, inicijalni WTP će se menjati prema funkciji:

$$\begin{aligned} & \text{if else } WTP_0 > \min WTP_N & (5) \\ WTP_1 &= WTP_0 - \left( \frac{\text{mean} WTP_N - (\min WTP_N)}{2} \right) \\ WTP_1 &= WTP_0 \end{aligned}$$

gde je:

**meanWTP<sub>N</sub>** - srednja vrednost WTP svih domaćinstava koja su umrežena.

Pored navedenih promena WTP-a pod dejstvom socijalne mreže, dodatani uticaj na promene WTP-a tokom vremena ostvaruje se i porastom broja održivijih sistema u populaciji. Svako domaćinstvo koje usvoji tzv. održivo grejanje, dodatno će povećati ličnu spremnost za investiranjem u održivije sistema za 10%. Na ovaj način, omogućava se pozitivna povratna informacija (*engl.* feedback) domaćinstva koje je usvojilo ovaj tip grejanja na ostala domaćinstva u mreži (Sopha, 2017). Predloženi modeli ažuriranja spremnosti da se plati više za održivije grejanje, odnosno parametra WTP, imaju za cilj da oslikaju trendove iz realnog života koji ukazuju da se globalno povećava ekološka svest i svest o potrebi efikasnijeg korišćenja energije u društvima tokom vremena. Studije koje su za predmet istraživanja imale svest pojedinaca o vlastitom doprinosu problemima, kao što su zagađenje životne sredine, klimatske promene i neodrživa potrošnja prirodnih resursa, ukazuju na pozitivan trend, odnosno porast svesti pojedinca o navedenim problemima (Smaldino i dr., 2017), (Gao i dr., 2020).

### 6.3. Instrumenti energetske politike i scenariji energetske tranzicije

U predloženom ABM modelu, simulirani su efekti instrumenata energetske politike usmerenih na ubrzanje energetske tranzicije. Takođe, sprovedena je i simulacija slučaja bez aktivnih instrumenata (*engl.* Business as usual - BAU). Tabela 9 prikazuje osnovne karakteristike predloženih instrumenata. U osnovu, radi se o dva pristupa, jedan koji podstiče zamenu sistema i drugi, koji uvodi zabranu korišćenja zastarelih sistema grejanja.

Tabela 9. Opis instrumenata energetske politike

Instrumenti	Opis
BAU	BAU simulira energetske tranzicije do 2050. godine prema trenutnim trendovima, bez spoljnog uticaja instrumenata.
Zabrana sagorevanja ogrevnog drveta i uglja u urbanim sredinama	Ovaj instrument podrazumeva uvođenje zabrane kupovine sistema koji se baziraju na ogrevnom drvetu i uglju u svim urbanim sredinama (ekstra urban i urban) od 2030. godine (Karpinska i Šmiech, 2021).
Subvencije za efikasnije sisteme grejanja	Ovaj instrument podrazumeva aktivaciju subvencije države od 50% za zamenu sistema baziranih na ogrevnom drvetu, uglju, kao i konvencionalnih sistema na el. energiju, za sisteme koji su bazirani na prirodnom gasu, peletu, ili za toplotne pumpe (EC, 2020c). Ovaj instrument aktivira ulazni parametar za domaćinstva „Spremnost da se uzme subvencija za zamenu sistema“, preuzet iz ankete (Pavlović i dr., 2021).
Kombinacija instrumenata	U ovom slučaju, ABM model izvršava simulaciju u kojoj se razmatraju združeni efekti dva predložena instrumenta.

Navedeni instrumenti za ubrzanje energetske tranzicije, kao i slučaj BAU (bez aktivne politike države), razmatrani su u okviru Referentnog scenarija (tj. Scenarija 1), koji se oslanja na ulazne podatke iz Tabele 8. Osnovne karakteristike Referentnog scenarija su:

- Osnovne karakteristike domaćinstava, osnovne karakteristike sistema za grejanja i stavovi domaćinstava prikupljeni u istraživanju (Poglavlje 5.4);
- Prema trendu od prethodnih godina, predviđeno je da će u urbanim sredinama 0,4% domaćinstava svake godine prelaziti sa individualnih sistema grejanja na postojeće sisteme daljinskog grejanja (SDG) u Srbiji (TOPS, 2021). Usled depopulacionih trendova na nivou države, migracije u gradove (RZS, 2021c), (Jovanović i dr., 2019), kao i činjenice da su postojeće mreže daljinskog grejanja u gusto naseljenim gradskim sredinama solidno razvijene, ABM model ne uzima u razmatranje razvoj novih SDG u sredinama u kojima do sada nisu izgrađeni, koji bi na taj način stvorili uslove za povezivanje većeg broja novih korisnika.
- Pretpostavljena cena po kojoj će rasti cene energenta i sistema grejanja je 3% godišnje.
- Emisioni faktori sistema grejanja ostaju nepromenjeni tokom vremena.

Da bi se ispitala robusnost modela, odnosno osetljivost rezultata Referentnog scenarija i predloženih instrumenata na spoljne uticaje i tzv. „potrese“, sprovedena je analiza osetljivosti. Praktično, u samom modelu su menjani određeni ulazni parametri i pretpostavke za koje se smatra da bi mogli uticati na konačne projekcije strukture grejanja do 2050. godine. U Tabeli 10 dat je opis predloženih scenarija

za analizu osetljivosti i reference iz literature kojima se potkrepljuju predložene promene ulaznih parametara i pretpostavki.

Tabela 10. Analiza osetljivosti - parametri

Scenario #	Opis
Scenario „CO <sub>2</sub> takse” (Scenario 2)	Scenario 2 predviđa povećanje cene električne energije za 6% svake godine usled uvođenja takse na proizvodnju električne energije iz fosilnih goriva (Wong i Zhang, 2022).
Scenario „Takse na lokalno zagađenje” (Scenario 3)	Scenario 3 predviđa povećanje cene na pelet, ogrevno drvo, prirodni gas i ugalj, usled takse na lokalno zagađenje koje nastaje sagorevanjem u individualnim ložištima (Țibulcă, 2021).
Scenario „Pad cena inovativnih tehnologija” (Scenario 4)	Scenario 4 predviđa da će toplotne pumpe postati konkurentnije na tržištu usled pada cena. Predviđa se godišnji pad cene od 2% što treba da dovede do veće priuštivosti ovih modernih sistema grejanja (Elia i dr., 2021), (Mercure i dr., 2021).
Scenario „Povećanje energetske efikasnosti stambenih objekata” (Scenario 5)	Scenario 5 predviđa da će se usled renoviranja objekata pre kupovine novog sistema, potrošnja energije za grejanje smanjiti za 30% (Foggia, 2018).

#### 6.4. Kodiranje ulaznih parametara za domaćinstvo

Slika 41 prikazuje primer na koji način su definisani ulazni podaci za jedno od domaćinstava u modelu, odnosno kako ih model prepoznaje. U konkretnom slučaju, prvo se, pod rednim brojem 1, može videti identifikacioni broj domaćinstva („id-number“) koji predstavlja kodnu oznaku domaćinstva iz ankete. Ovaj ulazni podatak nije od značaja za sam model, ali olakšava praćenje rezultata za samog korisnika modela.

Sledeća karakteristika je tip naselja („urban-rural“), gde se može uočiti da se u ovom slučaju radi o domaćinstvu u ruralnoj sredini. Dalje sledi parametar grejna površina („house-size“) sa kodnom oznakom „3“ što znači da je grejna površina veća od 100 m<sup>2</sup>. Posle toga, model učitava koji energent se koristi u sistemu grejanja („heat-system“). U ovom slučaju, to je prirodni gas („3“). Tip sistema („system-type“) ima oznaku „33“, što ukazuje da je reč o kotlu na gas za grejne površine preko 100 m<sup>2</sup>. Parametar „modern-system“ praktično u modelu razlikuje održivije sisteme (sistemi na pelet i toplotne pumpe) grejanja od ostalih. U ovom slučaju, oznaka „O“ ukazuje da domaćinstvo ne koristi održivije grejanje.

Parametri od rednog broja 7 do rednog broja 16, definišu efikasnost sistema, starost sistema, korisnu toplotu, prijavljenu potrošnju, emisione faktore i proračun emitovanih CO<sub>2</sub>, CO i NO<sub>x</sub>.

Parametri pod rednim brojevima 17. i 18. ukazuju da konkretno domaćinstvo nije spremno da investira više u održivije grejanje („wtp“ = 1) i da ne bi prihvatilo eventualnu subvenciju od 50% („subsidy“ = 1). Parametar „n-effect“ koji je u ovom slučaju označen kao „0“ ukazuje da domaćinstvo smatra da okruženje nema uticaja na izbor grejanja. Parametar „unwilling-to-change“ koji je označen kao „0“ ukazuje da domaćinstvo nije striktno zainteresovano da zadrži postojeći način grejanja i da kada dođe period zamene, spremno je da razmatra i druge dostupne sisteme na tržištu.

Parametar pod rednim br. 21 („electricity-co2“) u konkretnom primeru nema značaj, jer domaćinstvo ne koristi el. energiju. Inače, sam model ostavlja mogućnost za proračun emisije CO<sub>2</sub> za domaćinstva koja se greju na električnu energiju, tako što se uzima u obzir emisija CO<sub>2</sub> izražena u kgCO<sub>2</sub>/kWh proizvedene el. energije u elektroenergetskom sistemu.

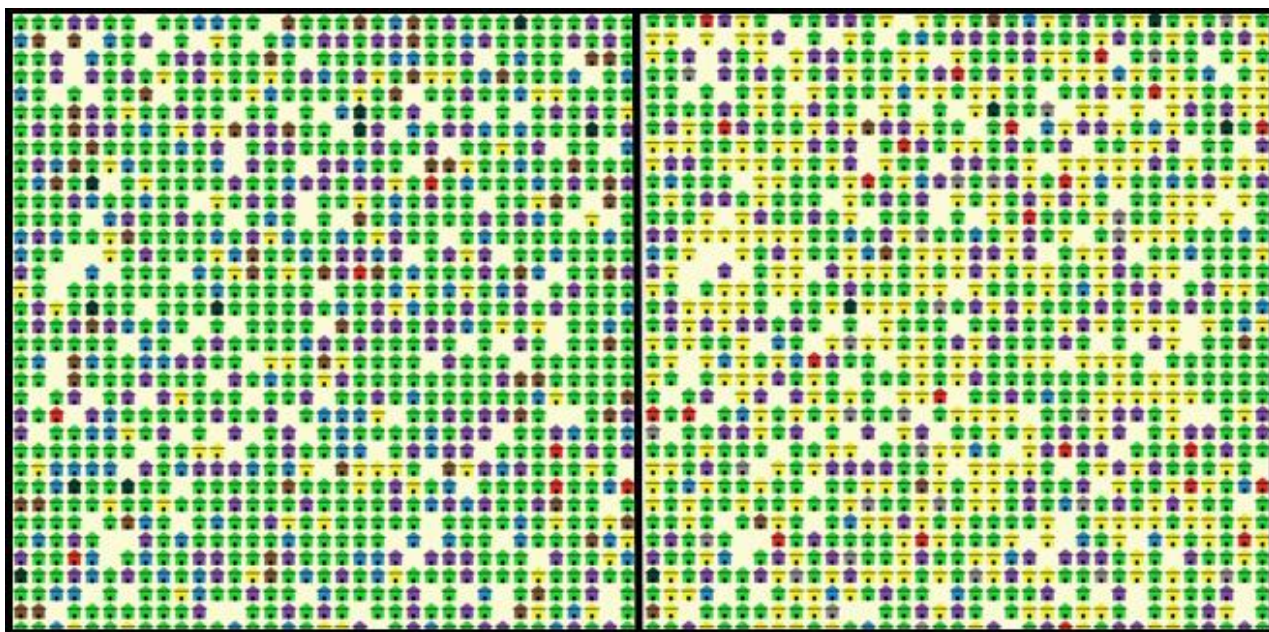
Parametar pod rednim brojem 22 („change-after?“) govori da je reč o domaćinstvu koje će zameniti sistem posle 23 godine korišćenja trenutnog sistema. Ovde je reč o parametru čija vrednost se dodaje slučajnom raspodelom u intervalu od 20 do 25 godina. Poslednji parametar („ne“) se takođe dodeljuje slučajnom raspodelom (od 4 do 8) i on govori sa koliko drugih domaćinstava je konkretno domaćinstvo povezano u mrežu. U ovom, slučaju, domaćinstvo je umreženo sa 8 domaćinstava.

1.	id-number	1278
2.	urban-rural	2
3.	house-size	3
4.	heat-system	3
5.	system-type	33
6.	modern-system	0
7.	system-effic	0.9
8.	system-age	15
9.	energy-kwh/y	13301
10.	energy-total	14779
11.	co2emission-factor	0.201
12.	co2total-emission	2970.57
13.	coemission-factor	6.0E-5
14.	cototal-emission	1
15.	noxemission-factor	2.1E-4
16.	noxtotal-emission	3
17.	wtp	1
18.	subsidy	1
19.	n-effect	0
20.	unwilling-to-change	0
21.	electricity-co2	0
22.	change-after?	23
23.	ne	8

Slika 41. Prikaz ulaznih parametara domaćinstva u NetLogo programu

Programiranje pomoću „NetLogo“ jezika u istoimenom programu vrši se u okviru opcije pod nazivom „Kodiranje“, a vizuelizacija simulacije se može pratiti u realnom vremenu u okviru opcije pod nazivom „Interfejs“. Slika 42 prikazuje izgled interfejsa za kreirani ABM model energetske tranzicije u grejanju domaćinstava, u početnoj i krajnjoj godini simulacije za jedan od analiziranih scenarija. Domaćinstva imaju oblik kućica koje su okarakterisane bojama prema sistemu, odnosno načinu grejanja domaćinstva u određenoj godini (grejnoj sezoni). Sistemi su definisani sledećim bojama:

- Grejanje na ogrevno drvo – zelena boja;
- Grejanje na el. energiju – ljubičasta boja;
- Grejanja na prirodni gas – plava boja;
- Grejanje na pelet – žuta boja;
- Grejanje na ugalj – braon boja;
- Grejanje na toplotne pumpe – crvena boja;
- Grejanje na poljoprivrednu biomasu – tamno zelena boja.



(a)

(b)

Slika 42. Vizuelni prikaz ABM simulacionog modela u NetLogo softveru u 2020. godini (a) i 2050. godini (b)

## 6.5. Rezultati ABM simulacionog modela

Dobijeni rezultati iz simulacionog ABM modela energetske tranzicije u domaćinstvima za predložene instrumente i scenarije osetljivosti, grupisani su u kategorije:

- Struktura sistema grejanja do 2050. godine,
- Projekcije emisije CO<sub>2</sub>,
- Projekcije lokalnog zagađenja.

### 6.5.1. Struktura sistema grejanja do 2050. godine

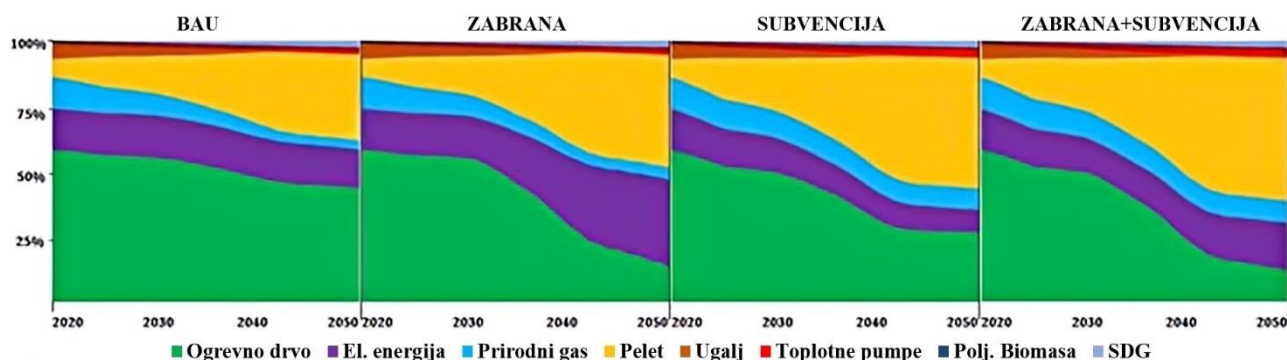
Kada su u pitanju rezultati simulacije za strukturu domaćinstava prema načinu grejanja, oni su prikazani prema udelu pojedinačnih načina grejanja u ukupnoj strukturi domaćinstava sa individualnim grejanjem. Referentni scenario energetske tranzicije za sve predložene instrumente, kao i za slučaj bez implementacije instrumenata energetske politike prikazan je na Slici 43. Najveći rast do 2050. godine imaće grejanje bazirano na peletu. U prvom slučaju, bez implementacije instrumenata (BAU), pelet će imati udeo od 32,7% 2050. godine i biće drugi najzastupljeniji način grejanja, odmah iza grejanja na ogrevno drvo. Kada bi se združeno primenili instrumenti zabrane sagorevanja ogrevnog drveta i uglja i subvencije za kupovinu održivijih sistema, grejanje na pelet bi postalo apsolutno dominantan način grejanja, sa udelom od 54,7%, a na drugom mestu bi bili konvencionalni sistemi na električnu energiju sa 18,3%.

Sistemi za grejanje bazirani na ogrevnom drvetu beleže najveći pad zastupljenosti u domaćinstvima. Od početnih 58% u 2020. godini do 43,5% u 2050. godini, u slučaju bez primene instrumenata (BAU), pa čak do 11,6% u slučaju primene oba razmatrana instrumenta, tj. zabrane loženja ogrevnog drveta i uglja u urbanim sredinama od 2030. godine i subvencija za efikasnije sisteme grejanja. U slučaju samo zabrane ovakvih sistema, a bez subvencija, oni bi opet zabeležili značajan pad, ali bi struktura bila drugačija. Bez paralelnog subvencionisanja efikasnijih sistema, zabrana bi rezultirala značajnim porastom broja grejalica, peći i kotlova na električnu energiju, čak 33,6% do 2050. godine.



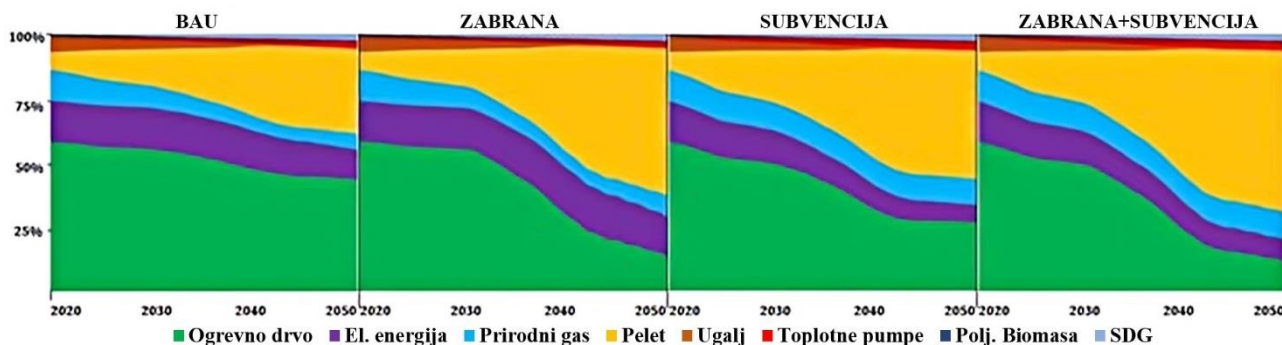
Upotreba uglja za grejanje beleži pad do 2050. godine i može se konstatovati da projekcije ABM modela ukazuju da će ugalj biti gotovo isključen iz upotrebe, pošto se beleži samo 0,6% sistema na ugalj na kraju razmatranog perioda. Sistemi na prirodni gas takođe beleže pad u korišćenju u domaćinstvima sa individualnim grejanjem. Njihov udeo u 2050. godini varira između 3,5% (slučaj BAU), 5% (slučaj zabrane sistema na ogrevno drvo i ugalj) i 8,6% (slučaj subvencija efikasnijih sistema grejanja).

Toplotne pumpe beleže porast u primeni od 3 (BAU slučaj) do 5 puta do 2050. godine, u slučaju subvencija. Međutim, i pored tog drastičnog skoka, njihova primena za grejanje i dalje bi bila marginalna sa 3,2% udela. Ova činjenica ukazuje da je veći prodor toplotnih pumpi za grejanje u domaćinstvima ograničen visokom cenom kapitalnih troškova ovog sistema, u odnosu na druge sisteme dostupne na tržištu.



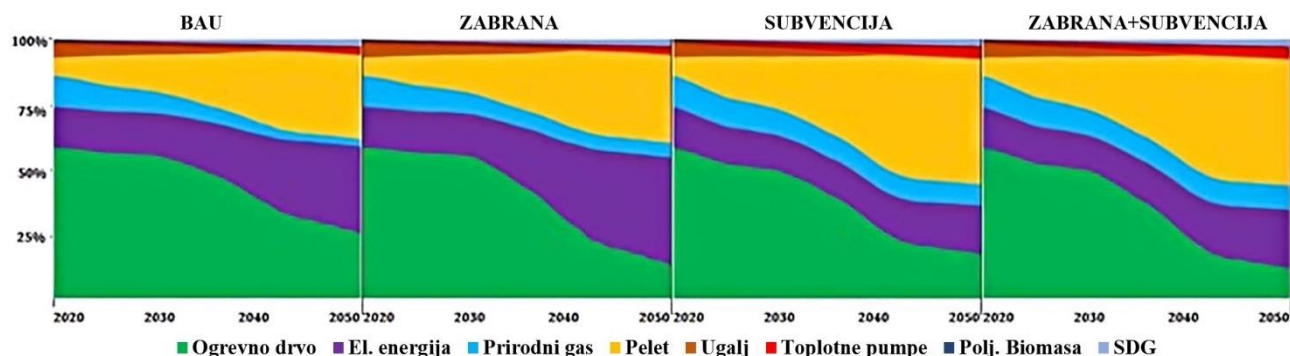
Slika 43. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Ref. scenario)

Kao što je prethodno navedeno, u cilju analize osetljivosti dobijenih projekcija na promene spoljnih činilaca, izvršena je analiza osetljivosti Referentnog scenarija kroz Scenarije 2-5, koji su prikazani na Slikama 44-47. Projekcija energetske tranzicije grejanja domaćinstava prema Scenariju 2 (Slika 44), koji predviđa veće cene električne energije u budućnosti, ukazuje da bi u tom slučaju bio očekivan manji udeo, pre svega, konvencionalnih sistema grejanja na električnu energiju. U toj situaciji, instrumenti zabrane loženja ogrevnog drveta i uglja i subvencija za održivije grejanje (sistemi na pelet i toplotne pumpe) doveli bi do još veće zastupljenosti sistema na pelet u populaciji od 62,8% u 2050. godini. Drugi način grejanja koji bi zabeležio rast jeste grejanje pomoću sistema na prirodni gas, koji bi bili zastupljeni sa oko 11% u 2050. godini. Što se tiče toplotnih pumpi, koje u svom radu takođe koriste električnu energiju, one bi bile podjednako zastupljene kao i u Referentnom scenariju i na njih ne bi uticalo poskupljenje struje. To je i očekivano imajući u vidu da model podrazumeva da je koeficijent grejanja toplotnih pumpi COP=3, što posledično podrazumeva manju potrošnju električne energije za grejanje, nego u slučaju korišćenja električnih kotlova, peći ili grejalica.



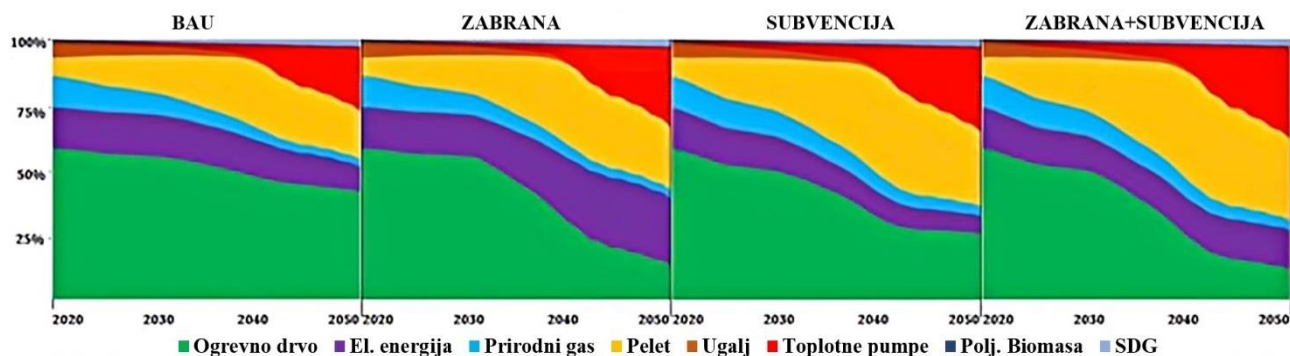
Slika 44. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Scenario 2)

U slučaju veće cene peleta, ogrevnog drveta, uglja i prirodnog gasa koje predviđa Scenario 3 (Slika 45), rezultati simulacionog ABM modela ukazuju na očekivani pad interesovanja za sisteme koji se baziraju na ovim energentima i na porast broja sistema koji koriste električnu energiju (grejalice, peći, kotlovi i toplotne pumpe), u odnosu na Referentni scenario. Bez primene instrumenata, udeo konvencionalnih električnih sistema grejanja bio bi čak 34% u 2050. godini, a sa primenom mera zabrane ogrevnog drveta i uglja i subvencija za održivije sisteme, udeo konvencionalnih električnih sistema bio bi oko 23%, što je opet više nego u Referentnom scenariju. Sa kombinovanom primenom instrumenata, udeo sistema na pelet bi bio 48,7%, što je u poređenju sa Referentnim scenarijom 6% manje. Istovremeno, udeo toplotnih pumpi bi bio 4,2%, što je 1% više u odnosu na Referentni scenario.



Slika 45. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Scenario 3)

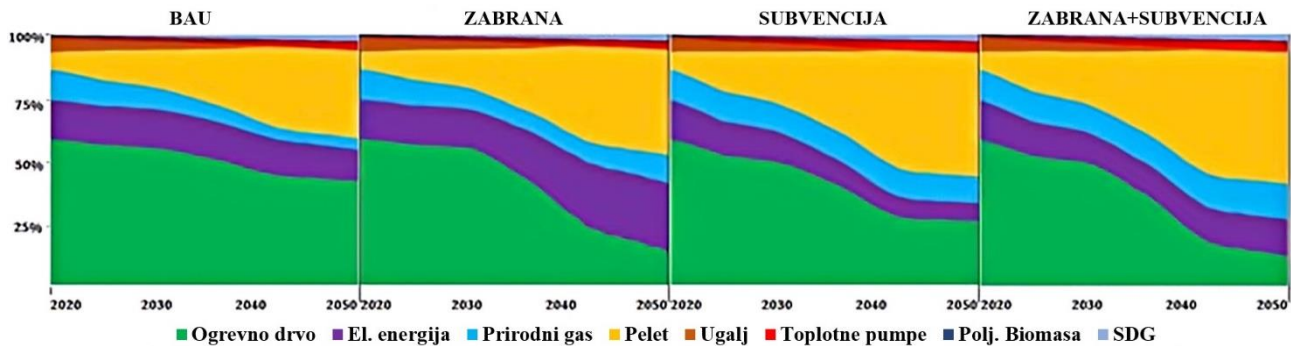
Dobijene projekcije u Scenariju 4 (Slika 46) ukazuju da bi se usled eventualnog pada cena toplotnih pumpi na tržištu moglo očekivati veće interesovanje domaćinstava za njihovu kupovinu. U periodu nakon 2037. godine u simulaciji se uočava ozbiljniji rast broja domaćinstava koja se odlučuju za toplotne pumpe, čak i slučaju bez primene instrumenata (BAU). To ukazuje da ovi sistemi postaju konkurentni sa ostalim sistemima na tržištu, čak i isplativiji vid grejanja. Do 2050. godine, ovi sistemi bi imali udeo d 24,6%, a zajedno sa sistemima na pelet, imali bi udeo od oko 42,5%. U tom slučaju bi grejanje na ogrevno drvo i dalje bilo veoma zastupljeno sa oko 41%. Međutim, ako bi se primenili instrumenti zabrane i subvencija zajedno, sistemi na ogrevno drvo bi pali na udeo od oko 11,5%, a grejanje na sisteme na pelet i toplotne pumpe bi bilo apsolutno dominantno sa 66,3% udela.



Slika 46. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Scenario 4)

Projekcije energetske tranzicije za Scenario 5 koji predviđa ulaganje u povećanje energetske efikasnosti objekata prikazane su na Slici 47. U ovom scenariju takođe se uočavaju promene u odnosu na Referentni scenario u pogledu strukture domaćinstava prema sistemima grejanja koji su u upotrebi do 2050. godine. Te promene karakteriše veća zastupljenost efikasnijih sistema grejanja, koja je posebno izražena u slučaju subvencije efikasnijih sistema grejanja, odnosno sistema na prirodni gas, sistema na pelet i toplotnih pumpi. U tom slučaju, udeo sistema na gas je približno 14,7%, što je i

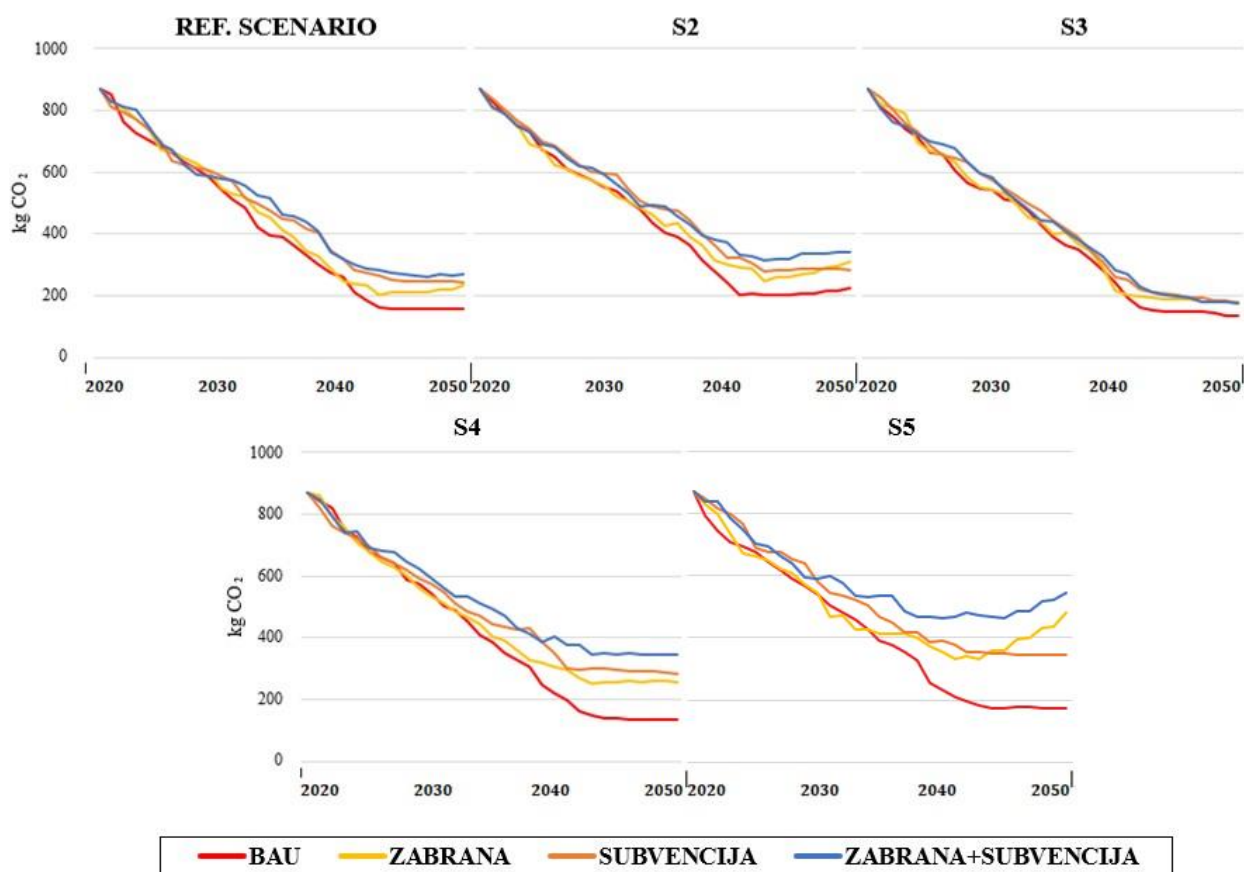
najveći projektovan broj domaćinstava sa ovim sistemom grejanja za bilo koji scenario. Sistemi na pelet, koji beleže rast u svim scenarijima, i u ovom scenariju bi bili dominantan način grejanja sa udelom od 52%. Toplotne pumpe u ovom slučaju takođe bi zabeležile porast primene do 2050. godine (3,6%), ali bi bile značajno manje zastupljene od sistema na prirodni gas i pelet, koji su priuštiviji za domaćinstva.



Slika 47. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Scenario 5)

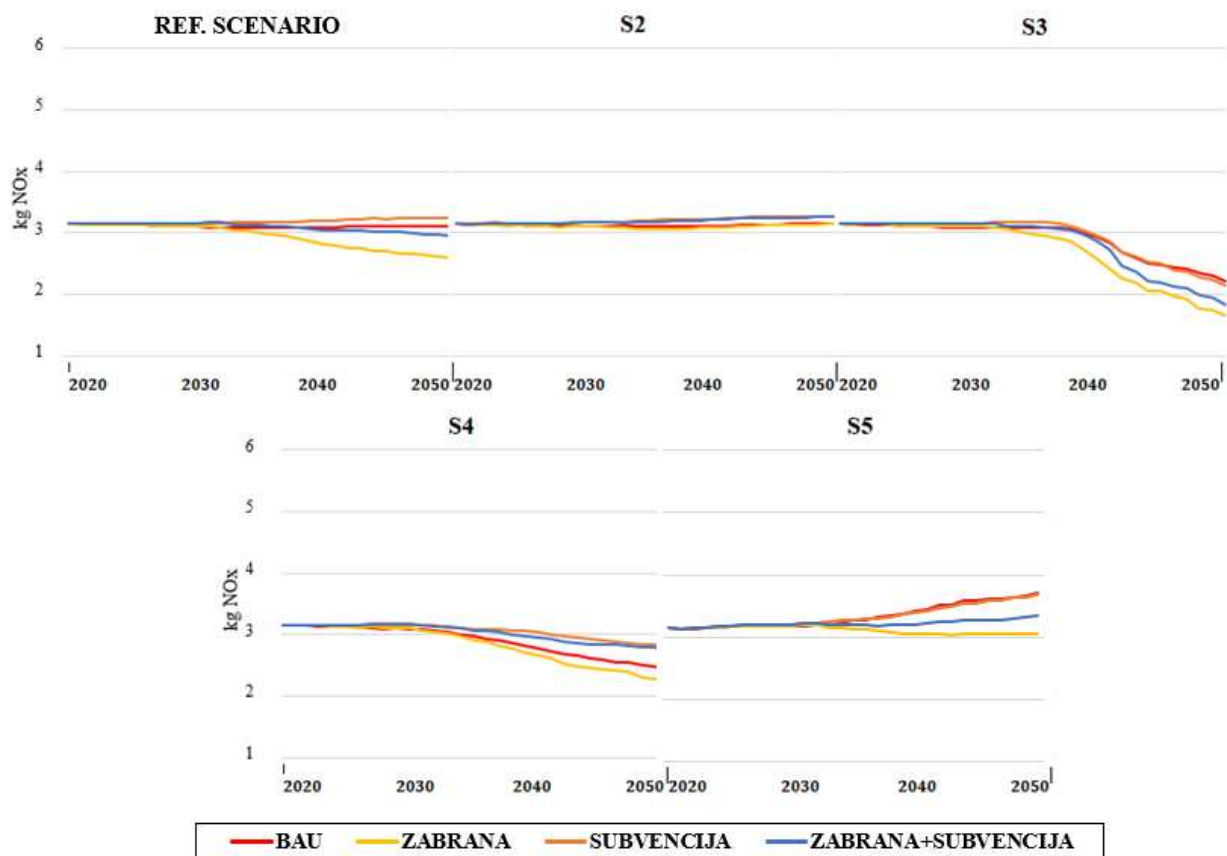
### 6.5.2. Projekcije emisije CO<sub>2</sub>

Rezultati energetske tranzicije za analizirane scenarije i predložene instrumente energetske politike, osim što se razlikuju po strukturi i zastupljenosti određenih sistema grejanja u populaciji do 2050. godine, razlikuju se i u pogledu lokalnih emisija CO<sub>2</sub>. Slika 48 prikazuje prosečne emisije CO<sub>2</sub> po domaćinstvu za svaki scenario tokom grejne sezone, u slučaju bez primene instrumenata, sa primenom pojedinačnih instrumenata i u slučaju kombinovane primene instrumenata. Kao što se može videti, lokalne emisije CO<sub>2</sub> koje potiču od individualnih sistema grejanja bi se smanjile u gotovo svakom scenariju do 2050. godine, osim u Scenariju 5, koji predviđa veći broj sistema na prirodni gas, a manji broj konvencionalnih sistema na električnu energiju (kotlovi, grejalice, peći), pa samim tim i veće lokalne emisije CO<sub>2</sub>. Važno je istaći da ovde nisu razmatrane emisije CO<sub>2</sub> koje potiču iz elektroenergetskog sektora, odnosno proizvodnje električne energije u termoelektranama u Srbiji, već samo direktne emisije iz individualnih sistema grejanja.

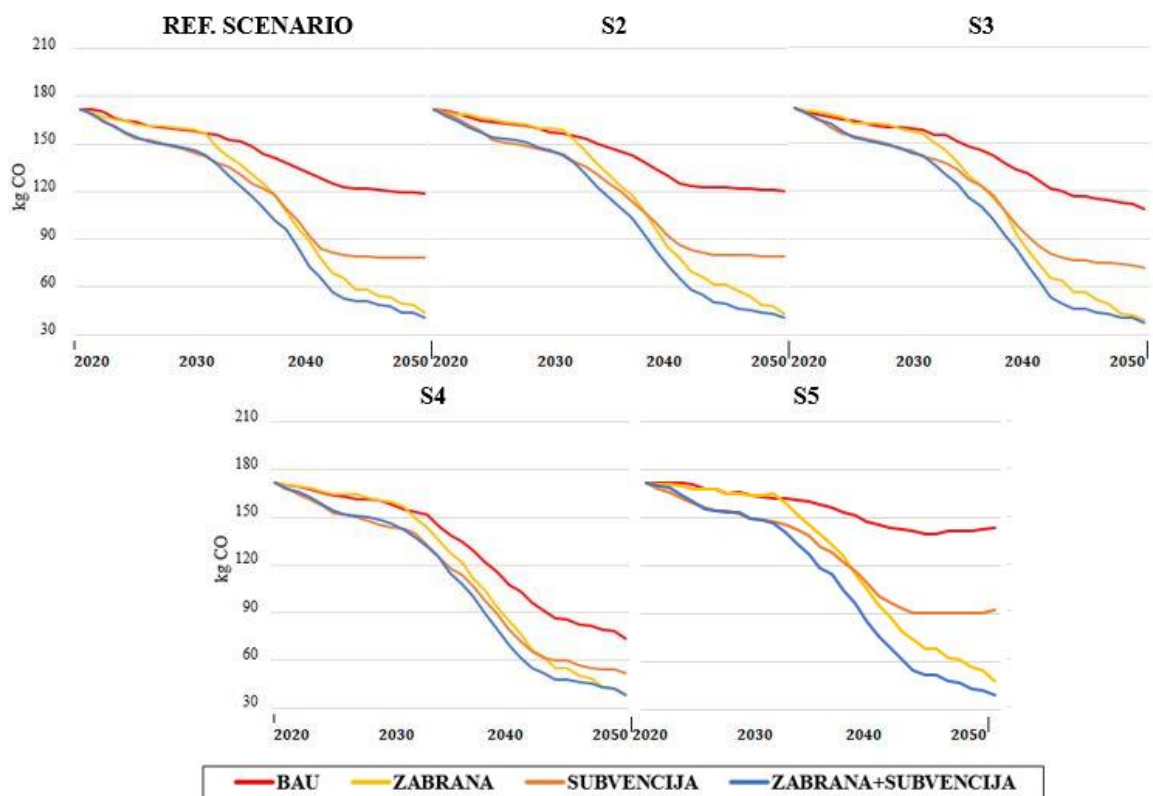
Slika 48. Godišnje CO<sub>2</sub> emisije od individualnog grejanja po domaćinstvu

### 6.5.3. Projekcije lokalnog zagađenja

Prosečne emisije NO<sub>x</sub> i CO po domaćinstvu sa individualnim grejanjem, u grejnoj sezoni, prikazane su na Slikama 49 i 50. Proračun se odnosi samo na emisije koje proizilaze iz grejanja na mestu upotrebe sistema, dakle oslikavaju lokalno zagađenje vazduha od grejanja. Kao što se može videti, NO<sub>x</sub> emisije beleže konstantan trend za Referentni scenario i Scenario 2, beleže pad u slučaju Scenarija 3 i Scenarija 4, a u slučaju Scenarija 5 beleže blagi rast, jer ovaj scenario predviđa veću zastupljenost sistema na prirodni gas na uštrb jednog broja sistema koji se baziraju na električnoj energiji. CO emisije opadaju u svakom od scenarija za analizu osetljivosti. Najmanji pad ima u slučaju Scenarija 5, bez primene instrumenata (tj. BAU), gde bi lokalne emisije zagađujućih materija porasle prvenstveno zbog zamene električnih kotlova, grejalica i peći (koji su lokalno neutralni sa aspekta zagađenja vazduha) za sisteme na prirodni gas. Prikazane projekcije lokalnog zagađenja vazduha koje je nastalo od grejanja nemaju za cilj da analiziraju lokalno zagađenje po naseljima ili regionima, već da posluže kao pokazatelj kako konkretni instrumenti energetske politike ili scenariji energetske tranzicije utiču na aspekt lokalnog zagađenja vazduha.



Slika 49. Godišnje NOx emisije od individualnog grejanja po domaćinstvu



Slika 50. Godišnje CO emisije od individualnog grejanja po domaćinstvu

## 6.6. Analiza rezultata ABM simulacionog modela

Rezultati simulacije u ABM modelu za Referentni scenario ukazuju da će proces energetske tranzicije u grejanju domaćinstava do 2050. godine karakterisati postepeno napuštanje grejanja na ugalj i delimično napuštanje grejanja na ogrevno drvo u zastarelim sistemima grejanja niske efikasnosti. Međutim, bez implementacije instrumenata energetske politike za ubrzanje energetske tranzicije, zastarele tehnologije na ogrevno drvo, ali i konvencionalni sistemi na električnu energiju, i dalje bi se većinski koristili. Prepreka nedostatka novca za investiranje u održivije grejanje, praćena ignorisanjem klimatskih, ekoloških i zdravstvenih posledica zastarelog grejanja kod dela populacije, i posedovanje vlastite šume u ruralnim sredinama, najverovatniji su razlozi velike zastupljenosti sistema na ogrevno drvo i u 2050. godini.

Energetska tranzicija u sektoru domaćinstva mogla bi da izgleda drugačije u slučaju aktiviranja potencijala koji leži u spremnosti domaćinstava da prihvate subvencije od 50% za kupovinu efikasnijih sistema grejanja. U tom slučaju, simulacija ABM modela pokazuje da krajem 2030-ih godina, sistemi na pelet preuzimaju dominantnu poziciju u načinu grejanja domaćinstava sa individualnim sistemima grejanja. U tim okolnostima, broj domaćinstava koja se greju na sisteme grejanja sa ogrevnim drvetom bi opao na ispod 12%. Ovakav trend može se tumačiti kao pozitivan sa aspekta efikasnijeg korišćenja drvne biomase u domaćinstvima, pre svega zbog ujednačenijeg sagorevanja kod peleta i garancije kvaliteta od strane proizvođača (hemijski sastav, toplotna moć, fizičke karakteristike). Takođe, u poređenju sa ogrevnim drvetom, kod korišćenja peleta su manje emisije zagađujućih materija u vazduh.

I pored subvencija i zabrana loženja ogrevnog drveta i uglja u urbanim sredinama, rezultati simulacije pokazuju da sistemi na ogrevno drvo i grejanje pomoću kotlova, peći i grejalica na električnu energiju neće biti potpuno napušteni kao način grejanja. U tim projektovanim okolnostima, takvi sistemi bi bili zastupljeni u oko 30% domaćinstava, što je donekle i razumljivo, ako se imaju u vidu rezultati ankete i argumentovani problemi nedostatka novca u delu populacije, ali i nacionalna statistika o prosečnim zaradama u državi. Delu domaćinstava ne bi bile dovoljne subvencije od 50% da bi prihvatili zamenu postojećih sistema za održivije ili efikasnije grejanje, pre sve svega zbog visine troškova sistema grejanja na pelet i toplotnih pumpi ili troškova sistema i priključka za grejanje na prirodni gas.

U prilog ovome govori i činjenica da bi, i pored visoke efikasnosti i nižih troškova grejanja, broj domaćinstava sa toplotnim pumpama u 2050. godini bio oko 3%. Iako taj broj jeste skoro 5 puta veći od broja u 2020. godini, rezultat ukazuje da je broj domaćinstava spremnih da izdvoje novac za kupovinu ovog sistema limitiran i da, ako su već spremni da prihvate subvenciju i sami investiraju u efikasnije grejanje, pre će moći da priušte sistem na pelet ili prirodni gas.

Ukoliko se ne bi aktivirale subvencije u ABM modelu, već samo zabrana upotrebe sistema na ogrevno drvo i ugalj u urbanim sredinama od 2030. godine, sistemi na pelet bi takođe imali najveći porast i bili bi najzastupljeniji sistem grejanja u populaciju. Ipak, efekti energetske tranzicije bi bili slabiji, jer bi izostala podrška za kupovinu efikasnijih sistema, pa bi deo domaćinstva prešao na konvencionalne sisteme grejanja na električnu energiju, čija cena je pristupačnija u odnosu na sisteme na prirodni gas ili toplotne pumpe, a i cena električne energije u Srbiji je među najnižima u Evropi. Takva struktura, u kojoj se trećina domaćinstava oslanja na grejanje pomoći električnih kotlova, peći i grejalica, teško se može okarakterisati kao održiva, a posebno ako se ima u vidu energetski miks u proizvodnji električne energije u Srbiji, gde trenutno oko 70% električne energije se dobija iz termoelektrana koje koriste lignit, a čija efikasnost je oko 33% (Jovanović i dr., 2019).

Sa aspekta energetske efikasnosti sistema grejanja koji bi se dominantno koristili do 2050. godine, rezultati simulacije ukazuju da bi kombinovana zabrana korišćenja ogrevnog drveta i uglja i subvencionisanje za kupovinu efikasnijih sistema doveli do rasta broja sistema koji koriste OIE na efikasniji način (toplotne pumpe i sistemi na pelet) i do približno konstantnog broja sistema na prirodni gas, a do pada broja niskoefikasnih sistema na ogrevno drvo i ugalj.

S obzirom da model inicijalno razmatra samo sisteme na pelet i toplotne pumpe kao tzv. održivije sisteme grejanja, kao i da model ne predviđa pojavu i prodor drugih sistema i energenata na tržište tokom vremena, dobijene rezultate za sisteme na pelet i toplotne pumpe treba posmatrati i analizirati u širem okviru i kontekstu. Naime, ovi rezultati bi trebali da se posmatraju kao ukupni potencijal u sektoru domaćinstva za prelazak na održivije, odnosno efikasnije, klimatski-neutralno i ekološki prihvatljivije grejanje, a ne striktno kao specifičan broj toplotnih pumpi ili kotlova i peći na pelet. U zavisnosti od budućih cena i kretanja na tržištu, dobijeni udeli ovih sistema se mogu međusobno prelivati jedni od ili do drugih, ili se mogu pregrupisati u neki novi održiviji način grejanja u budućnosti. Rezultati simulacije za Referentni scenario ukazuju da takav potencijal postoji za blizu 60% domaćinstava sa individualnim grejanjem.

Proračuni prosečnih emisija CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i CO iz sistema grejanja pokazuju opadajući trend kada su u pitanju emisije CO<sub>2</sub> i CO i blage promene kada su u pitanju emisije NO<sub>x</sub>. Izvestan pad emisije NO<sub>x</sub> mogao bi se očekivati u slučaju zabrane loženja ogrevnog drveta i uglja u urbanim sredinama, odnosno zabrane korišćenja tih sistema.

Analiza osetljivosti Referentnog scenarija, koja je sprovedena kroz Scenarije 2-5, ukazuje da je simulacija energetske tranzicije osetljiva na promene koje bi uticale spolja, kao što su promene u ceni određenih energenata, pad cena inovativnih tehnologija grejanja ili veće ulaganje domaćinstava u energetske efikasnost stambenih objekata.

Poskupljenje cene električne energije koju predviđa Scenario 2, dovelo bi do većeg udela sistema grejanja na pelet i prirodni gas. Mogao bi se očekivati veći broj sistema na pelet u domaćinstvima za 1% do 8% i sistema na prirodni gas od 2% do 3%, u zavisnosti od sprovođenja instrumenata energetske politike. Ovakav rezultat mogao bi se tumačiti kao pozitivan sa aspekta povećanja broja efikasnijih sistema grejanja u populaciji.

U slučaju porasta cena peleta, prirodnog gasa, ogrevnog drveta i uglja kao energenata, mogao bi se očekivati nešto veći broj toplotnih pumpi za 1% i veći broj konvencionalnih sistema na električnu energiju od 11% do 19% u ukupnoj strukturi domaćinstava sa individualnim sistemima grejanja, u zavisnosti od sprovedenih instrumenata. Ovakav rezultat međutim ne bi mogao da se tumači kao pozitivan zbog prethodnog argumenta o proizvodnji električne energije u Srbiji. Takođe, i kada se razmatraju efekti grejanja na emisije gasova staklene bašte i na zagađenje vazduha, energetski miks u proizvodnji električne energije ne treba zanemariti i ignorisati. Ipak, kako način proizvodnje električne energije ne zavisi direktno od odluka domaćinstava, ovaj aspekt nije analiziran kroz predloženi ABM model. Ovo pitanje svakako zavisi od buduće nacionalne energetske politike, a budući energetski miks biće definisan kroz energetske i klimatske planove koji su u pripremi (RS, 2021d).

U slučaju veće energetske efikasnosti (Scenario 3), domaćinstva bi bila motivisana da kupuju efikasnije sisteme grejanja, zbog uštede u potrošnji energenata na godišnjem nivou. U tom slučaju, projekcije ABM modela ukazuju da je moguće očekivati veći broj sistema na prirodni gas u domaćinstvima od 1% do 6%, a toplotnih pumpi od 1% do 2%, u zavisnosti od sprovedenih instrumenata.

U odnosu na navedene scenarije za analizu osetljivosti, značajno veće promene u strukturi izaziva Scenario 4, koji predviđa smanjenje cena inovativnih tehnologija, u ovom slučaju toplotnih pumpi. Simulacija u ABM modelu pokazuje da bi jednom u budućnosti, kada toplotne pumpe postanu konkurentne po ceni sa ostalim sistemima na tržištu, realistično bilo za očekivati da uslede masovnije investicije u ovakve sisteme (Elia i dr., 2021), (Mercure i dr., 2021). Udeo toplotnih pumpi u domaćinstvima bi do 2050. godine mogao biti u intervalu od 24,6 do 35,8%, u zavisnosti od sprovedenih mera za podsticaj kupovine efikasnijih sistema grejanja.

## 7. INTEGRACIJA ABM SIMULACIONOG MODELA U PROCES ENERGETSKOG PLANIRANJA

Energetsko modeliranje u cilju procene projekcija buduće potražnje, strukture potrošnje energije, transformacije, raspoložive energije i sl., najčešće se bazira na istorijskim trendovima, energetskim bilansima, ekspertskim procenama, ili na bazi statističkih metoda (IEA, 2014), (IRENA, 2018b), (Tang i dr., 2019). Ovakvi pristupi energetskom modeliranju su pokazali zadovoljavajuće rezultate u centralno vođenim energetskim sektorima i podsektorima, kao npr. u sektoru proizvodnje električne energije, daljinskom grejanju, različitim granama industrije itd. Međutim, kada je u pitanju sektor domaćinstva, u kome je potrošnja fragmentirana na pojedinačna domaćinstva, a struktura potrošnje heterogena, ovakvi pristupi ostavljaju određeni stepen neizvesnosti kod izrade projekcija finalne potrošnje energije kao i njene strukture.

U ovakvim slučajevima, potreba za analizom energetske politike i instrumenata pomoću više različitih metoda i pristupa modeliranju nameće se u cilju omogućavanja sadržajnijeg i sveobuhvatnijeg energetskog planiranja (Cajot i dr., 2017). Kombinacija više pristupa može da doprinese smanjenju neizvesnosti u projekciji potrošnje energije i planiranju, što naravno ipak ne znači da se ceo proces oslobađa od potpune neizvesnosti.

Integracija različitih metoda i alata za planiranje i modeliranje energetske tranzicije već neko vreme je prisutna u studijama koje za predmet imaju sektor domaćinstva (Dioha i Kumar, 2020), (Tian i dr., 2021), (Kadian i dr., 2007), (Wang i dr., 2015), (Csutora i dr., 2021), (Rue du Can i dr., 2019), (Živković i dr., 2016). Da bi se sprovedla analiza energetske potrošnje ili izvršila ocena određenih aspekata energetske tranzicije, autori se opredeljuju za kombinaciju metoda, baza podataka, softverskih alata i dr. Ovo sve ima značajan benefit kod dugoročnih energetskih modela sektora domaćinstva za podršku planiranju i donošenju odluka (Mirakyan i Guio, 2013), imajući u vidu pomenutu heterogenost u ovom sektoru, razlike u ponašanju i navikama i decentralizovano donošenje odluka na nivou domaćinstva. Potreba za dugoročnim planiranjem posebno se nameće kod planiranja energetske tranzicije u grejanju domaćinstava, imajući u vidu da i neke od najefikasnijih tranzicija u Evropi su trajale između 18 i 35 godina (Sovacool i Martiskainen, 2020). Da bi se smanjila inertnost dela domaćinstava po pitanju energetske tranzicije, donosioci odluka na različitim upravljačkim nivoima teže da, najčešće kroz mere podsticaja i edukacije, stvore pogodniju sredinu za uključivanje domaćinstava u energetsku tranziciju (Sovacool i Martiskainen, 2020).

U pristupu za modeliranje energetske potrošnje i ponašanja domaćinstava, koji predlažu Tian i dr. (2021), izvršena je integracija modeliranja na bazi agenata (ABM) i metode dubokog učenja u cilju analize različitih scenarija. Za analizu potrošnje energije u urbanim sredinama i posledice po zagađenje vazduha, Kadian i dr. (2007) koristili su metodologiju analize krajnjeg korisnika, zvanične statistike, trendove i dostupnu literaturu i razvili niz scenarija baziranih na pretpostavkama. Ovaj pristup integrisan je sa „LEAP“ softverskim alatom za energetsko modeliranje i analizu emisija (*engl.* Low Emissions Analysis Platform), u cilju analize potrošnje energije i energetskih pokazatelja. Za ispitivanje ponašanja pojedinaca u vezi sa grejanjem, Wang i dr. (2015) integrisali su anketu domaćinstava, merenje temperature u stambenom prostoru i terensko prikupljanje podataka u model koji je kreiran uz pomoć simulacionog alata „DeST“ (*engl.* Designer’s Simulation Toolkit). Csutora i dr. (2021) predlažu pristup koji integriše kvalitativne i kvantitativne metode istraživanja u cilju istraživanja obrazaca potrošnje energije i ponašanja domaćinstava. U ovaj pristup je, između ostalog, uključeno anketiranje domaćinstava za dobijanje konkretnih podataka, ekspertске procene i fokus grupe za narativni opis predmeta istraživanja. Za integraciju sektorske analize emisija CO<sub>2</sub>, Rue du Can i dr. (2019) koristili su „bottom-up“ pristup koji je integrisan u LEAP softverski alat za energetsko modeliranje. Živković i dr. (2016) su predložili pristup za analizu scenarija grejanja u urbanoj sredini i alternativa budućeg razvoja baziran na metodologiji poznatoj kao „Participatory Backcasting“ u cilju uključivanja zainteresovanih strana u zajedničko formiranje vizije i ciljeva budućnosti i razmene znanja. Ova metodologija integrisana je sa energetskim planiranjem u LEAP-u.



Navedeni primeri iz literature argumentuju prisutnost prakse integracije metodoloških pristupa i alata za energetske modeliranje. Prednosti integracije mogu se ogledati u detaljnijoj analizi predmeta istraživanja, kroz nadogradnju modela, kalibraciju modela, validaciju rezultata modela, združivanju različitih baza podataka i dr.

ABM model za simulaciju ponašanja domaćinstava vezanog za način grejanja (Poglavlje 6) i kreiranje projekcija načina grejanja do 2050. godine doprinosi analizi efekata političkih instrumenata na energetske tranzicije, ali sam po sebi nije dovoljan uslov za celovitu podršku u odlučivanju. Da bi našao svoju praktičnu primenu, ključno je integrisati ovaj model u jedan pristup koji bi obezbedio sredinu gde bi se kontinuirano procenjivao odziv domaćinstava na predloge i gde bi se procenjivali očekivani efekti predloženih instrumenata za podršku energetske tranzicije.

Već istaknuta komparativna prednost modeliranja „odozdo na gore“ kod sektora domaćinstva koja je postignuta kroz predloženi ABM simulacioni model, može biti dodatno nadograđena u slučaju integracije sa empirijski prikupljenim podacima o grejanju domaćinstava, kao što je prikazano u slučaju sektora domaćinstva u Srbiji. Dodatna kvalitativna i kvantitativna nadogradnja ovakve primene ABM simulacionog modela može se ostvariti kroz integraciju sa alatima za energetske modeliranje. Naime, pored simulacije ponašanja domaćinstava i njihovih reakcija na promene u spoljnoj sredini, na ovaj način bilo bi moguće analizirati i druge promene u energetske sistemu, koje nisu direktno vezane za ponašanje domaćinstva, a stvaraju posledice po potrošnju energije u sektoru domaćinstva. Ovim se stvaraju uslovi za integraciju ekspertske procene, makroekonomskih pokazatelja, domaćih i stranih naučnih i stručnih studija sa projekcijama promena u energetici (Hainsch i dr., et al., 2022), u delu koji sledi nakon simulacije u ABM modelu, čime se stiče šira slika o efektima instrumenata energetske politike na celo društvo (Waisman i dr., 2019).

Integracijom polaznih pretpostavki iz prikazanog ABM simulacionog modela u energetske modeliranje, može se izvesti pretpostavka da modeliranje buduće potražnje energije za grejanje u domaćinstvima zavisi od mnoštva individualnih odluka domaćinstava, koje će te odluke bazirati, osim na ceni grejanja, i na drugim kriterijuma analiziranim kroz ABM simulacioni model. S tim u vezi, pristup koji je primenjen kroz simulacije u ABM modelu, odnosno izlazni podaci o energetske tranzicije grejanja u domaćinstvima do 2050. godine pružaju mogućnost za dalju primenu i obradu u alatima za energetske modeliranje. Na ovaj način, izlazni podaci iz jednog modela mogu poslužiti kao ulazni podaci za drugi model, odnosno moguće je izvršiti integraciju ABM-a sa alatima za energetske modeliranje u cilju sveobuhvatnije analize i uspostavljanja šireg metodološkog okvira za podršku planiranju energetske tranzicije u sektoru domaćinstva.

Projekcija strukture sistema grejanja u domaćinstvima često je najveća nepoznanica kod izrade dugoročnih energetske modela. Koristeći predloženi ABM simulacioni model, koji je pohranjen podacima iz ankete domaćinstava (Poglavlje 5), došlo se do projekcija strukture koje su u velikoj meri nezavisne od individualnih ekspertske pretpostavki. Umesto da se predviđa stopa rasta određenih tehnologija, ili stopa pada u korišćenju zastarelih tehnologija, dinamika uvođenja novih tehnologija i promena načina grejanja u populaciji, kao i obim promena u posmatranom periodu, ispraćena je uz pomoć rezultata simulacija koje se baziraju na programiranom ponašanju individualnih domaćinstava iz reprezentativnog uzorka (Slika 39).

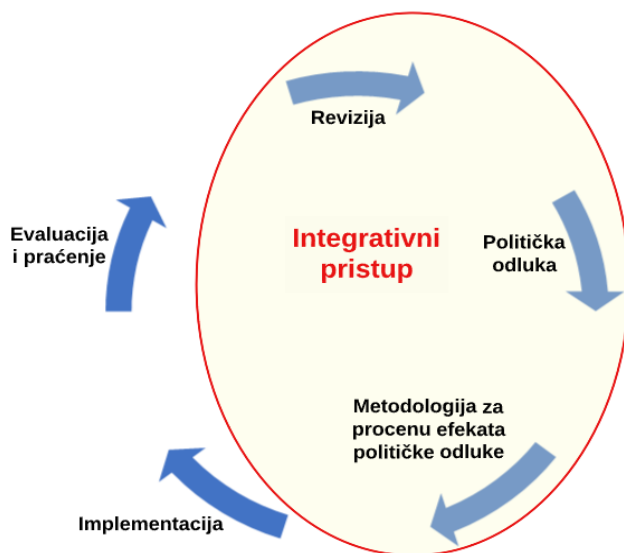
U tom smislu, dobijene projekcije o udelu pojedinačnih načina grejanja do 2050. godine predstavljaju podatak od značaja za energetske modeliranje potrošnje u sektoru domaćinstva za analizirane scenarije, ali i za dalju nadogradnju. Polazeći od rezultata simulacije u ABM modelu, uz pomoć alata za energetske modeliranje, moguće je izvršiti nadogradnju rezultata, prevodenjem strukture načina grejanja po domaćinstvima iz ABM modela, na nivo veće detaljnosti, tj. dovesti je vezu sa grejnom površinom stambenog prostora (izraženu u  $m^2$ ) u različitim tipovima naselja: urbanim i ruralnim. Sa aspekta energetske modeliranja, od velike je važnosti da se proceni projekcija potrošnje energije, a ona će pre svega zavisiti od grejne površine, koja će se takođe menjati u analiziranom periodu. Takođe, na ovaj način biće ostvarena i dodatna kalibracija modela, jer će u obzir biti uzeta istorijska potrošnja za grejanje u sektoru domaćinstva iz energetske bilansa. Na kraju, integracijom se stvorila

sredina za analizu tzv. „spoljnih“ aspekata tranzicije, kao što su demografski trendovi, raspoloživost prirodnih resursa, uvozna zavisnost i dr.

U nastavku će biti prikazan predloženi pristup integracije istraživanja o grejanju domaćinstava, ABM simulacionog modela i softverskog alata za energetske modeliranje LEAP za podršku planiranju i odlučivanju u definisanju instrumenata energetske politike, kao i njegova primena na primeru energetske tranzicije grejanja u sektoru domaćinstva u Srbiji.

### 7.1. Metodološki okvir

Mesto i uloga za predloženi integrativni pristup najbolje se može uočiti u slikovito prikazanim činocima u procesu definisanja i vođenja politike i njihovoj međusobnoj korelaciji (Slika 51). Integrativni pristup treba da unapredi ceo proces na taj način što će kroz metodologiju za procenu efekata konkretne politike obezbediti rezultate koji će ukazati da li je, i ako jeste, u kojoj meri potrebna revizija izvorne politike, tj. političke odluke o instrumentima za podršku energetske tranziciji, a pre prethodne implementacije instrumenata u realnom sistemu.



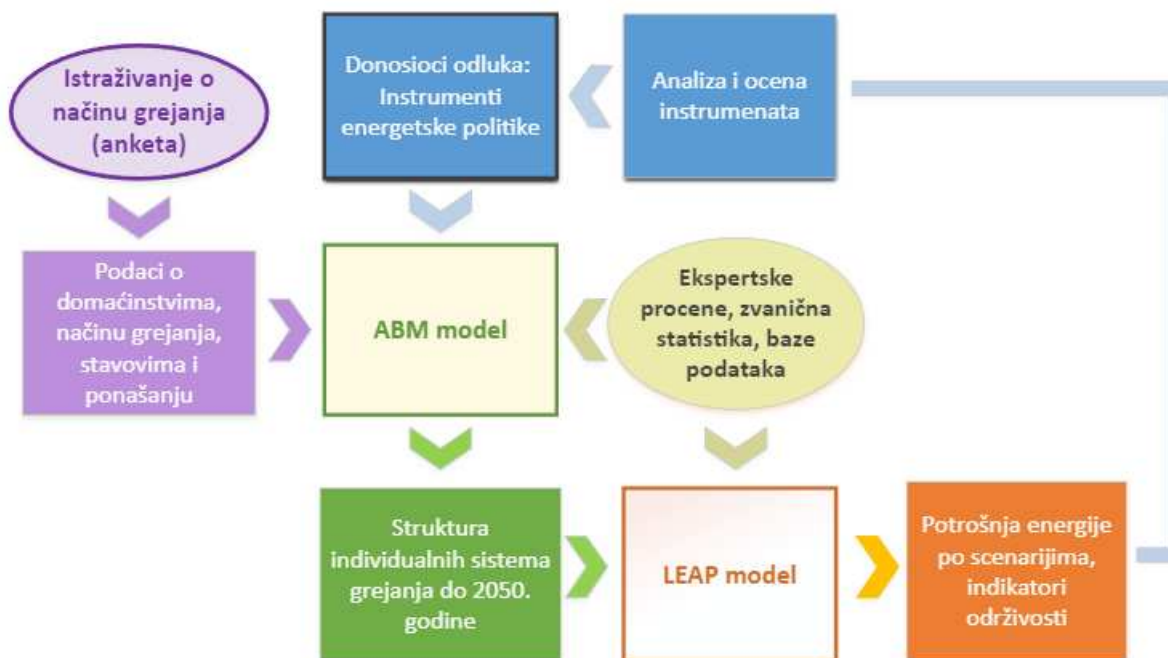
Slika 51. Mesto i uloga integrativnog pristupa u vođenju politike energetske tranzicije

Kreiranje pristupa koji omogućava povratnu vezu (Pan i dr., 2018) donosilaca odluka sa efektima instrumenata i scenarija energetske tranzicije postala je standardna praksa u energetskom planiranju, jer se time postiže veći kredibilitet razvijenih instrumenata i scenarija (González i Connell, 2022), (Andersen i dr., 2021). Osim toga, povezivanjem narativa iz instrumenata i scenarija sa rezultatima ankete, projekcijama simulacionog ABM modela i alata za energetske modeliranje može se stvoriti čvršći i konzistentniji pristup u energetskom planiranju.

Okvir predloženog pristupa, u smislu korišćene metodologije i toka celog procesa, prikazan je na Slici 52. Kao što se da uočiti, nakon simulacija u ABM modelu, dobijeni izlazni podaci o strukturi individualnih sistema grejanja mogu se dalje koristiti za modeliranje finalne potrošnje energije i odgovarajućih pokazatelja (energetskih i ekonomskih indikatora). Predloženim pristupom integracije, izlaz iz celog procesa daje detaljnije povratne informacije korisnicima, pre svega u smislu očekivane finalne potrošnje do 2050. godine i potencijalnih energetske ušteda.

Integrirani pristup je koncipiran tako da se dobijeni rezultati mogu koristiti kao povratne informacije za korigovanje ili definisanje novih instrumenata energetske politike. ABM model bi takođe na ovaj način mogao biti nadograđen kroz povratne informacije iz celog procesa i mogao bi uvrstiti i nove

varijable od uticaja na način grejanja domaćinstava. U celini gledano, ovako koncipiran integrativni pristup stvara uslove za komunikaciju i razmenjivanje znanja između eksperata različitih oblasti (Böhringer i dr., 2020), zainteresovanih strana (Živković i dr., 2016) i donosilaca odluka na lokalnom ili nacionalnom nivou, čime se obezbeđuje veća transparentnost i robusnost energetskeg planiranja (Kachirayil i dr., 2022).



Slika 52. Okvir predloženog integrativnog pristupa

Integracijom ABM modela sa LEAP alatom za energetske modeliranje korisniku se dozvoljava da projektuje buduću energetske potrošnju za grejanje, koja proizilazi iz ponašanja domaćinstava i njihovog izbora načina grejanja. Takođe, integracijom sa LEAP alatom pruža se mogućnost za modeliranje dodatnih scenarija koji mogu oslikavati potencijalne promene u energetskeg sistemu, koje nisu direktno vezane za ponašanje i odluke domaćinstava. Na primer, to mogu biti različite projekcije demografskeg razvoja, različiti scenariji tranzicije elektroenergetskog sektora, odnosno promene u strukturi proizvodnje električne energije, ili sistemsko podizanje energetske efikasnosti objekata podržano od strane države, i sl. Na kraju, integracijom sa LEAP softverskeg alatom stvaraju se uslovi za integraciju projekcija energetske tranzicije u domaćinstvima i pratećih energetskeg bilansa u energetskeg model sa drugim sektorima, tj. sa celokupnim nacionalnim energetskeg sistemom.

## 7.2. Energetske modeliranje u LEAP-u

Kako je prikazano na Slici 52, energetske modeliranje energetske tranzicije u grejanju domaćinstava je izvršeno u LEAP softverskeg alatu za energetske modeliranje i analizu emisija nakon simulacije po scenarijima u ABM modelu. LEAP softverskeg alat omogućava energetske modeliranje različitog stepena složenosti i moguće ga je prilagoditi u odnosu na stepen dostupnih podataka (Heaps, 2022). Modeliranje u LEAP softverskeg alatu može se koristiti za praćenje potrošnje energije ili proizvodnje u svim sektorima, srednjoročno ili dugoročno (Nieves i dr., 2019).

U konkretnom slučaju, LEAP je izabran za energetske modeliranje potrošnje energije za grejanje u domaćinstvima iz nekoliko razloga. Ovaj softverskeg alat zahteva licencu za korišćenje, ali je uz registraciju besplatan za korišćenje u edukativne svrhe. Najčešća primena LEAP-a jeste za studije

slučaja u vremenskim intervalima 20-50 godina, a sam alat omogućava da se kreiraju i ocenjuju alternativni scenariji i međusobno porede prema energetske intenzitetu, emisijama gasova staklene bašte, zagađujućim materijama ili različitim pokazateljima održivosti (SEI, 2017). Još jedna prednost LEAP-a je nizak nivo zahteva za početnim podacima. Mnogi alati za energetske modeliranje se oslanjaju na vrlo specifične i često složene algoritme i stoga imaju tendenciju nefleksibilnosti. Razvoj podataka za takve modele zahteva relativno visok nivo stručnosti. Nasuprot tome, mnogi aspekti modeliranja u LEAP-u su opcioni, samim tim zahtevi za početnim podacima mogu biti dosta niži i zasnovani na relativno jednostavnoj statističkoj obradi podataka i računskim operacijama (Heaps, 2022).

LEAP je alat koji omogućava kreiranje modela različite složenosti i strukture i omogućava primenu različitih metodologija, makroekonomsko modeliranje (odozgo na dole), ili modeliranje krajnjih korisnika (odozdo na gore). Pored toga, proračuni potrošnje energije najčešće se sprovode na godišnjem nivou, što je praktično sa aspekta grejanja, koje je u ABM modelu praćeno sezonski po godinama. Dodatna prednost integracije ABM modela i LEAP modela jeste u jednostavnom postupku uvoza podata, imajući u vidu da NetLogo pruža mogućnost izvoza podataka u XLS/XLSX fajlove, a LEAP alat omogućava uvoz istih fajlova.

Obezbeđujući strukturu domaćinstava prema načinu grejanja, odnosno zastupljenim sistemima grejanja u tim domaćinstvima, za analizirane instrumente energetske politike, stižu se uslovi za koncipiranje LEAP modela koji bi pre svega služio za modeliranje finalne potrošnje energije, ali po potrebi i drugih izlaznih informacija. Suština je u sintezi projekcija podataka koji utiču na ukupnu potrošnju energije, a koje nisu rezultat simulacija u ABM-u i rezultata iz ABM simulacionog modela, koji utiču kako na ukupnu potrošnju tako i na njenu strukturu.

Detalji vezani za ulazne podatke biće prikazani kroz primer modeliranja individualnog grejanja u sektoru domaćinstva u Srbiji.

### 7.3. Studija slučaja – individualno grejanje u domaćinstvima u Srbiji

Da bi se potrebna energija za grejanje u modelu kalibrisala prema potrošnji iz energetskog bilansa za 2020. godinu (Eurostat, 2022b), finalna potrošnja energije za grejanje u domaćinstvima sa individualnim sistemima u Srbiji za 2020. godinu je dobijena na sledeći način:

$$E_{IH} = E_T \times S_H - E_{DH} \quad (6)$$

gde je:

- $E_{IH}$  - Godišnja potrošnja energije za grejanje u domaćinstvima sa individualnim sistemima grejanja (kten);
- $E_T$  - Finalna potrošnja energije u sektoru domaćinstva za 2020. godinu (3.488,1 kten) (Eurostat, 2022a);
- $S_H$  - Udeo grejanja u finalnoj potrošnji energije u domaćinstvima (66,3%) (Eurostat, 2022b);
- $E_{DH}$  - Toplotna energija za grejanje domaćinstava u sistemima daljinskog grejanja (436 kten) (RZS, 2022a).

Iz izraza (5) sledi da je potrošnja energije za grejanje u domaćinstvima sa individualnim sistemima grejanja u Srbiji za baznu 2020. godinu:

$$E_{IH} = 1.876,6 \text{ kten} \quad (7)$$

Ulazni podaci za tip naselja i grejnu površinu prikazani su u Tabeli 11. Prosečna grejna površina za baznu godinu preuzeta je iz (RZS, 2022b). Kao ulazni podaci uzete su prosečne površine stanova u

gradskim i ruralnim naseljima. Struktura domaćinstava prema tipu naselja je preuzeta iz uzorka za anketiranje domaćinstava (Pavlović i dr., 2021), i ona je približna sa podacima Republičkog zavoda za statistiku, gde je udeo domaćinstava u gradskim naseljima oko 59% (RZS, 2021c). Kada je u pitanju stopa rasta grejne površine, na osnovu trenda rasta broja stanova od 1971. do 2011. godine (RZS, 2022b), projektovan je godišnji rast grejne površine od 0,5% do 2050. godine.

Tabela 11. Ulazni podaci za tip naselja i grejnu površinu

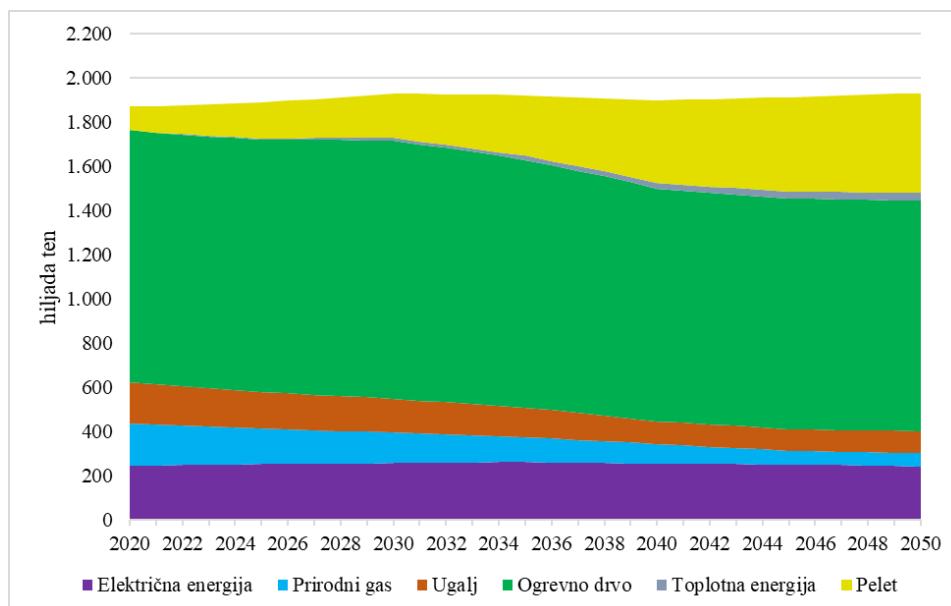
Tip naselja	Domaćinstva prema tipu naselja (%)	Domaćinstva prema grejnoj površini (m <sup>2</sup> )
Urbana naselja	58%	68,6 m <sup>2</sup>
Ruralna	42%	74,9 m <sup>2</sup>

#### 7.4. Projekcije finalne potrošnje energije

Korišćenjem izlaznih podataka iz ABM simulacionog modela o strukturi domaćinstava prema načinu grejanja (vrsti energenta i sistema grejanja) i tipu naselja, i projektovane finalne potrošnje energije za grejanje u domaćinstvima sa individualnim sistemima grejanja do 2050. godine u LEAP-u, dobijeni su podaci i o potrošnji pojedinačnih energenata u navedenom periodu. U nastavku su date projekcije finalne potrošnje energije po energentima za Referentni scenario iz ABM simulacionog modela (bez primene instrumenata i sa primenom instrumenata) i za Scenario 4 iz ABM simulacionog modela (slučaj sa kombinovanom primenom instrumenata zabrane sistema na ogrevno drvo i ugalj u urbanim sredinama i instrumenata subvencija za kupovinu efikasnijih sistema grejanja). Scenario 4 je izabran kao scenario koji je projektovao najveći rast primene toplotnih pumpi za grejanje.

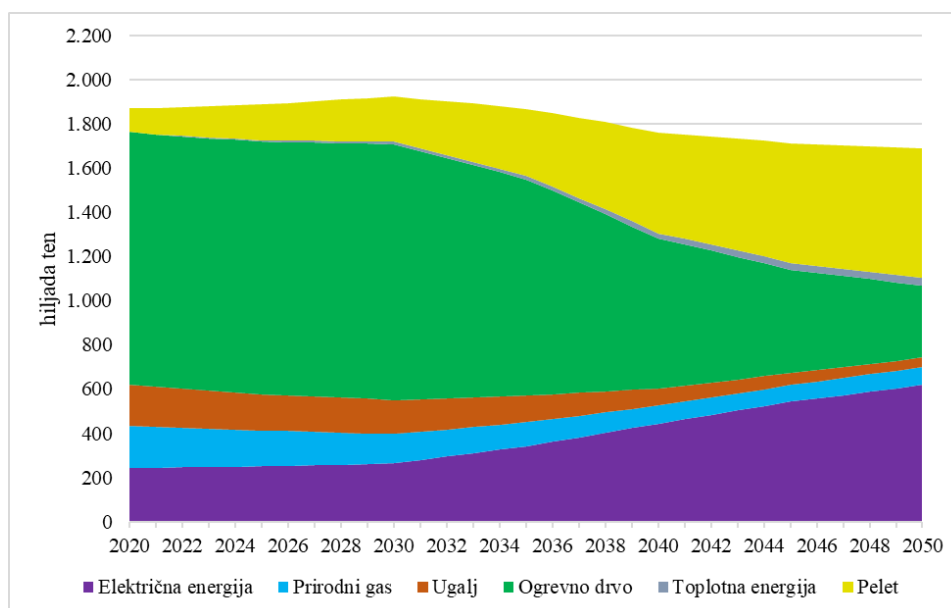
Dodatno, kroz LEAP je analiziran i poseban „ekspertski scenario“, koji predviđa primenu mera energetske rehabilitacije objekata gde bi se potrošnja energije smanjila za 30%, po stopi od 1% godišnje ukupne grejne površine. Ovaj „ekspertski scenario“ analiziran je bez primene instrumenata u Referentnom scenariju, ali i u Scenariju 4, sa kombinovanom primenom predviđenih instrumenata.

Slika 53 prikazuje projekciju finalne potrošnje za Referentni scenario, slučaj bez primene političkih instrumenata za ubrzanje energetske tranzicije. Iako u ovom slučaju dolazi do smanjenja potrošnje ogrevnog drveta, koje karakteriše primena u sistemima grejanja manje energetske efikasnosti, nego u npr. sistemima koji koriste pelet za grejanje, a koji beleže porast potrošnje, uočava se da u ovom slučaju dolazi do porasta ukupne finalne potrošnje do 2050. godine, sa 1.876,6 kten na 1.931,9 kten, tj. porasta od oko 3%.



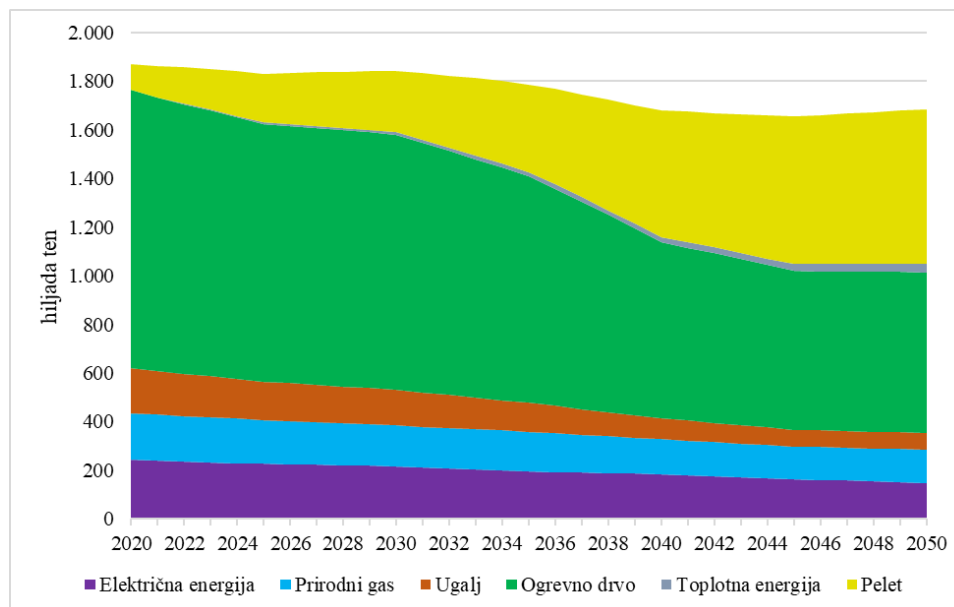
Slika 53. Finalna potrošnja za Referentni scenario – slučaj BAU

Na Slici 54 prikazana je projekcija finalne potrošnje za Referentni scenario sa primenom instrumenta zabrane sistema na ogrevno drvo i ugalj u urbanim sredinama od 2030. godine. U ovom slučaju dolazi do pada u finalnoj potrošnji energije 2050. godine, pre svega zbog smanjenja udela neefikasnih sistema na čvrsta goriva, od blizu 10% u odnosu na 2020. godinu. Ne računajući slučaj Referentnog scenarija bez primene mera energetske rehabilitacije i političkih instrumenata za ubrzanje energetske tranzicije (Slika 53), ovo je slučaj koji beleži najmanji pad potrošnje, što se može tumačiti činjenicom da je zabrana dovela do napuštanja grejanja na ogrevno drvo i ugalj u urbanim sredinama, ali zbog odsustva subvencija, domaćinstva su najčešće prelazila na grejanje pomoću električne energije – električni kotlovi, grejalice i peći, a nisu se odlučivali za grejanje na toplotne pumpe zbog visoke cene uređaja.



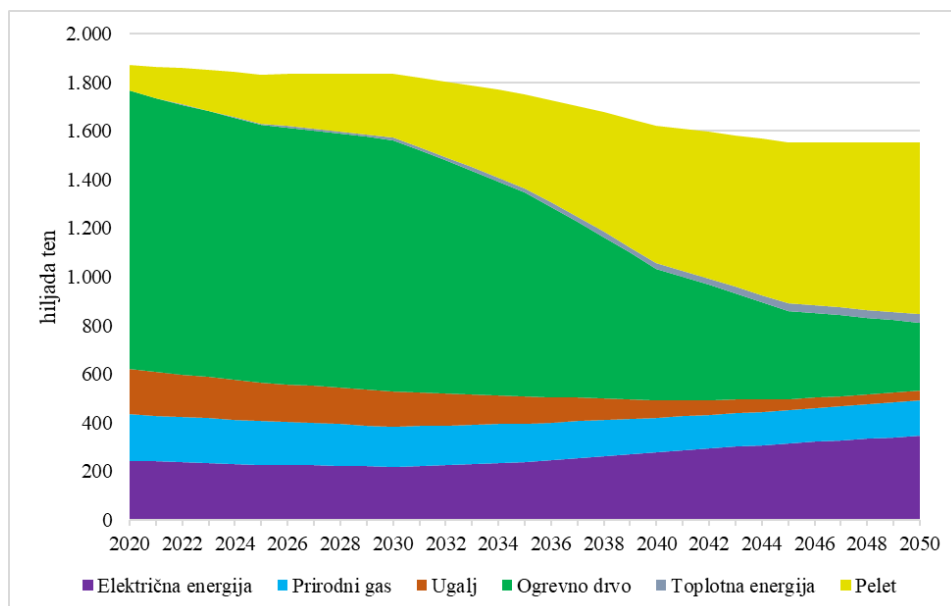
Slika 54. Finalna potrošnja za Referentni scenario – instrument zabrane sagorevanja u urbanim sredinama

Slika 55 prikazuje projekciju finalne potrošnje za Referentni scenario i slučaj primene instrumenta subvencije za efikasnije sisteme grejanja. U ovom slučaju, smanjenje potrošnje je nešto veće do 2050. godine – oko 10,2%, nego u slučaju zabrane sagorevanja ogrevnog drveta i uglja. Činjenica je da jeste više porastao broj efikasnijih sistema na pelet, nego u prethodnom slučaju, ali je ostao veći broj neefikasnih sistema na ogrevno drvo, jer nije došlo do primene instrumenta zabrane sagorevanja ogrevnog drveta.



Slika 55. Finalna potrošnja za Referentni scenario – instrument subvencije za efikasnije sisteme grejanja

Kada se analizira potražnja za energijom u Referentnom scenariju, najveće smanjenje potražnje za energijom moglo bi se očekivati u slučaju kombinovane primene instrumenata zabrane i subvencije (Slika 56). U 2050. godini, to smanjenje može biti oko 17% u odnosu na baznu 2020. godinu. Ovaj slučaj predviđa najveći pad korišćenja neefikasnih sistema za grejanje na ogrevno drvo i istovremeno povećanje udela sistema grejanja sa većim stepenom efikasnosti, kao što su sistemi grejanja na pelet, toplotne pumpe i konstantan udeo sistema grejanja na prirodni gas, koji takođe imaju veću efikasnost od sistema grejanja na ogrevno drvo i ugalj.

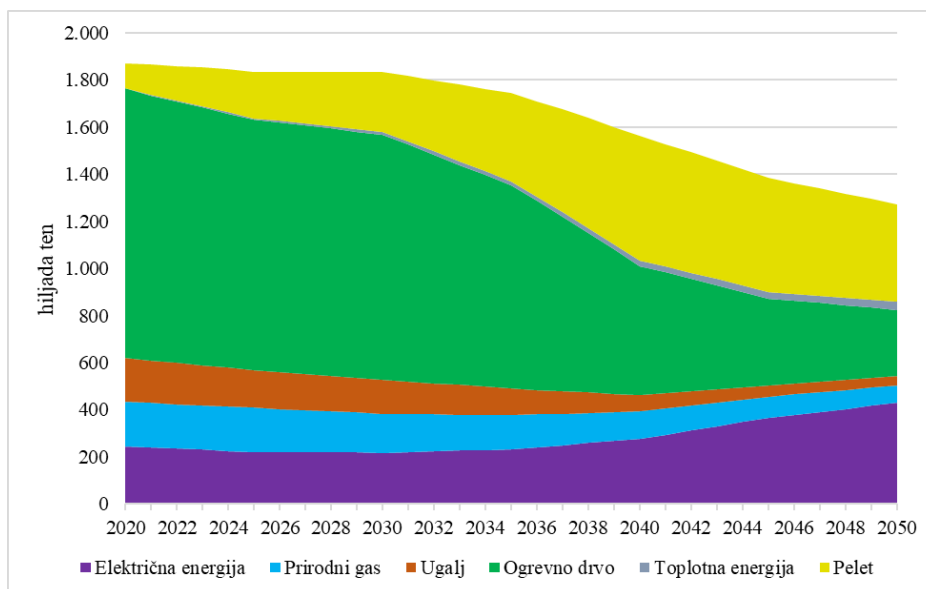


Slika 56. Finalna potrošnja za Referentni scenario – kombinacija zabrane i subvencija

Projekcija finalne potrošnje energije prema energentima za scenario sa najvećim prodorom toplotnih pumpi u domaćinstva sa individualnim sistemima grejanja (Scenario 4), slučaj sa kombinacijom instrumenata zabrane sagorevanja uglja i ogrevnog drveta u urbanim sredinama i subvencije za efikasnije sisteme grejanja, prikazana je na Slici 57. U ovom slučaju moglo bi se očekivati najveće smanjenje potražnje za energijom, koje je najviše posledica veće primene toplotnih pumpi koja bi usledila sa pretpostavljenim padom cene ove tehnologije. Prema ovom scenariju, potražnja za energijom u 2050. godini, u odnosu na 2020. godinu, manja je za oko 32%.

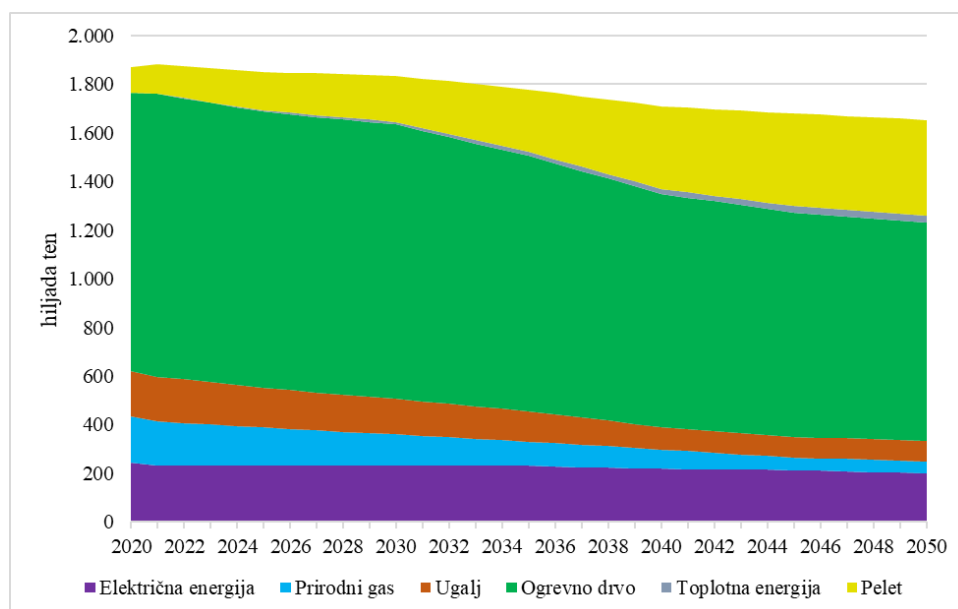
Iako se u Scenariju 4 (slučaj kombinovane primene instrumenata zabrane i subvencija) udeo održivijih sistema grejanja (toplotne pumpe i sistemi na pelet) u 2050. godini razlikuje za oko 5-6% u odnosu na Referentni scenariju sa kombinovanom primenom instrumenata zabrane i subvencija, projektovana finalna potrošnja energije za grejanje je u slučaju Scenarija 4 manja za oko 280 kten u 2050. godini. Razlog za ovu razliku jeste što je u Scenariju 4 značajno veći broj toplotnih pumpi u domaćinstvima, nego u Referentnom scenariju, gde je veći broj sistema grejanja na pelet. Projekcije finalne potrošnje u LEAP-u pružile su precizniju sliku koliko razlika u strukturi održivijih sistema grejanja (u ovom slučaju toplotne pumpe i sistemi na pelet) donosi uštede energije na nivou celog sektora domaćinstva.





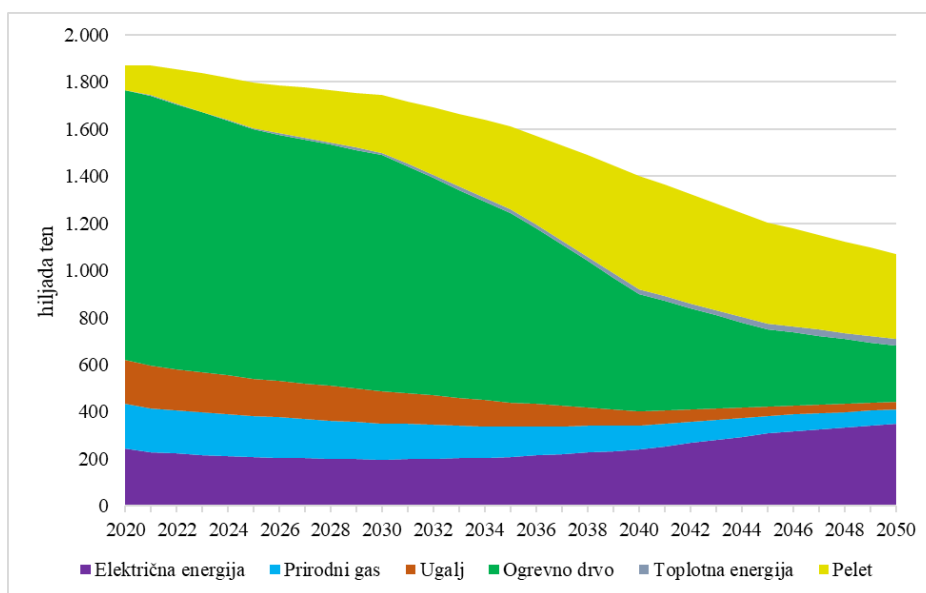
Slika 57. Finalna potrošnja za Scenario 4 – kombinacija zabrane i subvencija

Projekcije finalne potrošnje sa razmatranom merom energetske rehabilitacije objekata, koja je razmatrana kao dodatna mera na postojeće scenarije u ABM simulacionom modelu, prikazane su na Slikama 58 i 59. Slika 58 prikazuje projekciju finalne potrošnje za Referentni scenario sa primenom mera energetske rehabilitacije objekata. Kao što se uočava, u ovom slučaju je moguće ostvariti uštede u potrošnji od oko 12% u odnosu na 2020. godinu, iako je struktura sistema grejanja u domaćinstvima ista kao u slučaju prikazanom na Slici 53.



Slika 58. Finalna potrošnja za Referentni scenario + energetska rehabilitacija – slučaj BAU

Slika 59 prikazuje projekciju finalne potrošnje u domaćinstvima u slučaju primene mera energetske rehabilitacije zajedno sa slučajem iz Scenarija 4 (Slika 57). Kao što se uočava, u ovom slučaju je potražnja za energijom ubedljivo najmanja u 2050. godini, u odnosu na sve druge razmatrane slučajeve, čak 43% manja, nego u 2020. godini.



Slika 59. Finalna potrošnja za Scenario 4 (kombinacija zabrane i subvencija) + energetska rehabilitacija

U Tabeli 12 sumirana je projekcija finalne potrošnje energije u domaćinstvima sa individualnim sistemima za grejanja do 2050. godine, za izabrane scenarije i instrumente energetske politike, koji su prikazani na prethodnim slikama. U ovoj tabeli se uočava da kombinovana primena instrumenata za ubrzanje energetske tranzicije, analizirana kroz ABM model, doprinosi većim uštedama u potrošnji, nego analizirane mere energetske rehabilitacije pojedinačno. To pre svega znači da zamena postojećih sistema grejanja za efikasnije sisteme sama po sebi donosi veće benefite od pretpostavljene rehabilitacije objekata. Svakako, ako se govori o najoptimalnijem slučaju sa aspekta ušteda energije, onda je najbolji scenario energetske tranzicije tzv. „Energetska rehabilitacija + Scenario 4 (zabr. + subv.)“, koji bi obezbedio združeno sprovođenje svih pretpostavljenih političkih instrumenata, sa merama energetske rehabilitacije, i uz pretpostavljeni pad cena toplotnih pumpi na tržištu grejanja.

Tabela 12. Projekcije finalne potrošnje energije u domaćinstvima za grejanje (u kten)

Scenario	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ref. scenario (BAU)	1.876,6	1.888,6	1.928,9	1.920,9	1.898,3	1.913,5	1.931,9
Ref. scenario (zabrana)	1.876,6	1.888,1	1.922,4	1.868,7	1.761,0	1.713,2	1.690,6
Ref. scenario (subvencije)	1.876,6	1.830,9	1.843,8	1.786,8	1.678,2	1.655,5	1.685,3
Ref. scenario (zabr. + subv.)	1.876,6	1.832,4	1.833,8	1.752,1	1.620,6	1.554,1	1.553,8
Scenario 4 (zabr. + subv.)	1.876,6	1.834,9	1.833,2	1.743,0	1.562,2	1.383,3	1.272,4
Energetska rehabil. (BAU)	1.876,6	1.850,7	1.834,3	1.775,7	1.710,0	1.679,9	1.653,9
Energetska rehabil. + Scenario 4 (zabr. + subv.)	1.876,6	1.797,9	1.743,5	1.610,7	1.402,9	1.204,0	1.069,6

## **7.5. Analiza primene integrativnog pristupa**

Energetski modeli za projekciju finalne potrošnje koji se baziraju na ekspertskim procenama i istorijskim trendovima kroz skup istraživačkih scenarija teže da odgovore na pitanje „šta ako?“. Polazna argumentacije kod analize primene ovakvih pristupa je bila da oni mogu imati izvesna ograničenja kod analize sektora koji su heterogeni i gde promene zavise od mnoštva pojedinačnih odluka. Oslanjanjem isključivo na ekspertsko ili stručno znanje u oblasti relevantnih naučnih disciplina, mogle bi se zapostaviti prepreke koje ometaju tranziciju ka održivijem grejanju i pokretači za ubrzanje tranzicije, odnosno kvantitativna procena njihovog uticaja. Ovako predloženom integracijom, obezbeđeni su realni podaci, stavovi, iskustva i percepcije potrošača, čime je model oslobođen pretpostavki u delu gde su energetski modeli ovog tipa posebno osetljivi, a to je upravo kvantifikacija efekata političkih instrumenata na krajnje potrošače.

Predložena metodologija integrativnog pristupa pruža mogućnost reevaluacije u određenim vremenskim intervalima, korišćenjem istog reprezentativnog uzorka. Time se obezbeđuje mogućnost korekcije instrumenta koji su podrška tranziciji, uvažavajući promene na energetskom tržištu, efekte nekih drugih instrumenata, ali i neizvesnosti koju se ne mogu unapred predvideti i obuhvatiti modelom.

Kroz predloženi pristup takođe je obezbeđena sredina za ocenu efikasnosti predloženih instrumenata za ubrzanje energetske tranzicije kroz proces simulacije ponašanja potrošača, pre implementacije u praksi. Ocena, u konkretnom smislu, može biti višekriterijumska, odnosno može se vršiti ocenjivanje sa više različitih aspekata, imajući u vidu da predloženi integrativni pristup omogućava kombinaciju i „bottom up“ pristupa iz ABM simulacionog modela, i „top down“ pristupa, u smislu uključivanja različitih makroekonomskih, energetskih, ekoloških i društveno-političkih pokazatelja i trendova kroz LEAP alat.

Na primer, neki od pokazatelja koji su od značaja za energetske tranziciju u grejanju domaćinstava koji se mogu izračunati i pratiti pomoću ovog pristupa su:

- Finalna potrošnja energije po m<sup>2</sup> godišnje i kvantifikacija ušteda energije;
- Ušteda energije na 1000 € investicije;
- Smanjenje emisije po 1000 € investicije;
- Uvozna zavisnost, odnosno samodovoljnost nacionalnog energetske sistema u osiguranju energenata za potrebe grejanja.

Integrativni pristup je primenjen za izradu projekcija finalne potrošnje energije u domaćinstvima za grejanje pomoću individualnih sistema grejanja, za različite scenarije energetske tranzicije i instrumente energetske politike. Predloženi pristup je prevashodno razvijen da obezbedi sredinu za ocenu specifičnosti tranzicije grejanja u sektoru domaćinstva. Međutim, metodologija se takođe može koristiti u procesu donošenja odluka u ranoj fazi razvoja instrumenata energetske politike i za druga pitanja vezana za energetske tranziciju u sektoru domaćinstva.

## 8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Planiranje je uslov za kvalitetno upravljanje i vođenje procesa energetske tranzicije. Da bi planiranje bilo temeljno i svrsishodno, neophodno je dubinsko razumevanje aktuelne energetske tranzicije, kako njene tehničko-tehnološke, tako i šire društveno-ekonomske komponente. Predmet istraživanja u disertaciji je energetska tranzicija domaćinstava, tačnije tranzicija ka održivijem grejanju, kao segmentu potrošnje u domaćinstvu na koji se troši ubedljivo najviše energije i finansijskih sredstava. Efekti energetske tranzicije u grejanju jesu najmerljiviji deo uspešnosti tranzicije u sektoru domaćinstva imajući u vidu potencijal koji leži u uštedi energije, smanjenju emisija gasova staklene bašte, smanjenju lokalnog zagađenja i smanjenju negativnih efekata po zdravlje. Praktično, može se reći da na tranziciji u načinu grejanja počiva uspešnost celog procesa energetske tranzicije u domaćinstvima.

Ne samo na nivou Srbije, već i šire gledano, energetska tranzicija u grejanju domaćinstava se odvija sporo. Kako je praksa pokazala, brzina zamene dominantno prisutnih sistema grejanja u domaćinstvima evidentno ne zavisi samo od brzine tehnoloških inovacija i njihove dostupnosti na tržištu. Prisutne su brojne prepreke, od kojih neke imaju lokalne specifičnosti, što otežava globalni pristup u planiranju ovog procesa. Da bi se ispitao širok spektar prepreka, i da bi se one kvalitativno i kvantitativno procenile, treba obezbediti pristup koji teži da holistički sagleda pitanje energetske tranzicije i da se ne oslanja striktno na istorijske trendove tranzicije i ekspertske procene.

Kao što je sprovedeno istraživanje u disertaciji o grejanju u domaćinstvima u Srbiji pokazalo, način grejanja je većinski uzrokovan ustaljenim praksama ponašanja u društvu. Takođe, struktura individualnih sistema grejanja uslovljena je i životnim vekom sistema grejanja i finansijskim stanjem domaćinstava. Kupovina novog sistema grejanja zahteva značajna finansijska sredstva i nije racionalno očekivati da se instalirani sistemi grejanja mogu često menjati za modernije tehnologije koje su prisutne na tržištu. Istraživanje je pokazalo da je za skoro 60% domaćinstava najveća prepreka cena modernijih sistema grejanja, odnosno nemogućnost da se priušti zamena zastarelih sistema grejanja. Sledeća specifičnost energetske tranzicije u sektoru domaćinstva jesu i višestruki kriterijumi koje domaćinstva žele da zadovolje konkretnim načinom grejanja, što je potvrđeno i kroz istraživanje. Neki od tih kriterijuma su i međusobno suprotstavljeni, kao npr. toplotni komfor, količina novca koji se troši za nabavku energenta, intenzitet lokalnog zagađenja, sredstva za kapitalna ulaganja u termoizolaciju objekata i zamenu zastarelih tehnologija grejanja i dr.

Da brzina tehnoloških inovacija i priuštivost nisu jedini činioci od uticaja, ukazano je kroz dobijene rezultate o stavovima domaćinstava. Pored priuštivosti, najčešća prepoznata prepreka je nezainteresovanost, koja je opšteg karaktera i kako je istraživanje pokazalo, obuhvata više različitih prepreka koje su najčešće subjektivne prirode. Iz tog razloga, ova prepreka je svakako najinertnija na eventualne podsticaje i promene okruženja kroz vreme. Druge prepreke koje su identifikovane od manjeg broja domaćinstava su nedostatak informacija i neobaveštenost, nedovoljna podrška države i nerazvijeno tržište, tj. neadekvatna ponuda.

U cilju razvijanja pristupa za podršku planiranju energetske tranzicije u domaćinstvima, u sklopu disertacije je razvijen ABM simulacioni model koji teži da svojom primenom unapredi čitav proces planiranja i obezbedi nove informacije o pitanju energetske tranzicije u domaćinstvima u Srbiji. Mogućnost ispitivanja višeslojne prirode energetske tranzicije do 2050. godine pomoću ABM metode pružilo je sredinu za istraživanje uočenih prepreka i ocenu potencijalnih pokretača energetske tranzicije u domaćinstvima kroz pristup „odozdo na gore“.

ABM metoda je obezbedila uslove za definisanje svakog domaćinstva kao potrošača pojedinačno i time se otvorila mogućnost za uključivanje širokog spektra atributa svakog domaćinstva, koji su prikupljeni kroz istraživanje o grejanju domaćinstava. Još jedna prednost koju je ABM metoda omogućila jeste da se kroz simulaciju definišu interakcije između agenata (domaćinstava), ali i agenata sa spoljnom sredinom. Na ovaj način, uključuju se reakcije ljudi na spoljašnje uticaje i

evolucija u promeni ponašanja kroz vreme, što je u prošlosti retko bila praksa kod planiranja energetske tranzicije u sektoru domaćinstva.

ABM simulacioni model je primenjen za analizu političkih instrumenata za ubrzanje energetske tranzicije. Kroz simulaciju ponašanja domaćinstava pružena je mogućnost ocene efekata različitih politika pre njihove direktne implementacije. U disertaciji su razmatrana dva instrumenata, jedan usmeren na podsticanje kroz subvencije za kupovinu efikasnijih sistema i drugi, koji se ogleda u zabranama upotrebe zastarelih sistema grejanja na čvrsta goriva u urbanim sredinama. Iz rezultata simulacije energetske tranzicije u uslovima primene političkih instrumenata može se izvući zaključak da brža energetska tranzicija predviđa jedan vid državnog intervencionizma za stimulisanje prelaska na održivije grejanje i smanjenje sadašnje prakse zastarelog i niskoefikasnog grejanja. Tako nešto nije novina u uspešnim praksama u Evropi i evidentno je da buduća klimatska neutralna politika, koja je pokretač trenutne tranzicije, ne može biti prepuštena samo domaćinstvima.

Konkretno, simulacija u ABM modelu upućuje na sledeće zaključke:

- Bez uvođenja političkih instrumenata, grejanje pomoću sistema baziranih na ogrevnom drvetu i dalje bi bilo dominantno sa preko 40% udela do 2050. godine.
- Analizirani politički instrumenti za ubrzanje energetske tranzicije doveli bi do veće zastupljenosti efikasnijih sistema grejanja i manjeg zagađenja vazduha. Sa paralelnim uvođenjem instrumenata subvencije i zabrane korišćenja zastarelih sistema grejanja na čvrsta goriva, udeo sistema na ogrevno drvo bi opao na oko 11% u posmatranom periodu.
- U slučaju samo zabrane sagorevanja ogrevnog drveta i uglja u urbanim sredinama, upotreba ogrevnog drveta bi takođe imala opadajući trend, ali zabrana bi rezultirala i značajnim porastom broja grejalica, peći i kotlova na električnu energiju (oko 33% u 2050. godini), što znači da ne bi došlo do većeg uvođenja efikasnijih sistema.
- Efekat subvencija posebno je očigledan kada je u pitanju porast broja efikasnijih sistema grejanja. U okolnostima primene subvencija, do 2050. godine najveći udeo sistema grejanja u domaćinstvima imali bi održiviji sistemi grejanja koji koriste OIE na efikasniji način. Politička podrška koja je usmerena ka stimulisanju kupovine efikasnijih sistema grejanja smanjuje rizik privatnih investicija u čistu energiju, jer deo kapitalnih troškova za kupovinu novog sistema grejanja snosi država.

Kada su u pitanju rezultati simulacije koji se odnose na projektovani udeo efikasnijeg i održivijeg grejanja, kao što je i u analizi rezultata primene ABM modela navedeno, njih treba posmatrati u širem svetlu potencijala koji je moguće ostvariti adekvatnom politikom, a ne striktno ukupnim projektovanim brojem sistema grejanja na pelet ili brojem toplotnih pumpi. Razvoj tehnologija u budućnosti i kretanja na tržištu teško je predvideti i kratkoročno, a posebno za period od 30 godina. Sadašnje istraživanje može dati uvid u to u kom pravcu bi politika trebalo da bude usmerena da bi se unapredio i ubrzao proces energetske tranzicije. Ocena instrumenata na ovaj način treba da doprinese široj slici šta bi određene politike donele.

Analiza osetljivosti simulacije energetske tranzicije sprovedena je da bi se ispitali struktura grejanja domaćinstava i trendovi emisija CO<sub>2</sub> i lokalnog zagađenja vazduha do 2050. godine u slučaju promena uslova iz Referentnog scenarija. Svrha analize osetljivosti kroz scenarije jeste da se testira osetljivost modela na promene u okruženju. Glavna zapažanja koja proističu iz analize osetljivosti kroz scenarije jesu:

- Uvođenje CO<sub>2</sub> takse na električnu energiju izazvalo bi porast cena električne energije, što bi posledično dovelo do porasta korišćenja ogrevnog drveta i fosilnih goriva.
- Oporezivanje lokalnih emisija zagađujućih materija iz individualnih ložišta bilo bi impuls za korišćenje električne energije za grejanje, koje bi se zbog nedostatka finansijskih sredstava za ulaganje baziralo najpre na konvencionalnim električnim kotlovima, grejalicama i pećima.
- Povećana energetska efikasnost objekata bila bi podsticaj za jedan deo domaćinstava da izaberu efikasnije sisteme grejanja.

- Slučaj masovnijeg korišćenja tehnologije toplotnih pumpi mogao bi se očekivati uz dostignutu zrelost tehnologija i pretpostavljeno posledično smanjenje cena toplotnih pumpi. U tim okolnostima, mogao bi se očekivati najveći porast primene ove tehnologije i ujedno najveći udeo održivijeg grejanja u 2050. godini, od preko 66%.

Povezivanje simulacije u ABM modelu sa modeliranjem u LEAP softverskom alatu obezbedilo je nadogradnju dobijenih rezultata kroz projekciju energetske potrebe za grejanja u razmatranom periodu, ali je pre svega poslužilo da se na primeru ovakve integracije prikaže praktičan značaj predloženog pristupa za podršku energetske planiranju. Ovim je otklonjena potreba za pretpostavkama o budućoj strukturi individualnih sistema grejanja kod projekcije finalne potrošnje energije, ali je takođe omogućena kalibracija finalne potrošnje energije sa podacima iz zvaničnog energetskeg bilansa. Osim toga, omogućeno je da se rezultati iz ABM simulacionog modela dalje razrađuju sa makroekonomskog aspekta, aspekta uvozne zavisnosti, odnosno samodovoljnosti energetskeg sistema, ili da se integrišu sa energetskim modelima u drugim sektorima, kao npr. sektorom proizvodnje električne energije, proizvodnje toplotne energije u sistemima daljinskog grejanja i dr.

Integracijom ABM simulacionog modela sa LEAP alatom jasno je da se otvara jedno šire polje primene predložene metodologije. Ovaj pristup obezbeđuje sredinu za uključivanje zainteresovanih strana u kreiranje politika i razmenu znanja, ali obezbeđuje i uključivanje u analizu drugih „spoljnih“ činilaca, tj. činilaca izvan domaćinstava, koji takođe mogu uticati na energetske potrebe. Time su stvoreni uslovi da se ABM simulacioni model, koji izvorno predstavlja pristup „odozdo na gore“, integriše i sa modeliranjem „odozgo na dole“.

Sumirajući rezultate koji su proizašli iz integracije navedenih pristupa, može se uočiti da postoji značajan potencijal za postizanje uštede energije u grejanju domaćinstava ukoliko se zamene postojeći zastareli sistemi grejanja za održivije sisteme, pre svega toplotne pumpe, ali i ukoliko se uloži u energetske rehabilitacije stambenih objekata. Iz izvršene analize instrumenata energetske politike može se izvući zaključak da svaki od uočenih problema i svaka od identifikovanih prepreka pružaju široku paletu mogućih odgovora. Grejanje u domaćinstvima je trenutno u takvom stanju da pruža veliki potencijal za unapređenje na različitim poljima, od individualnog sistema grejanja u upotrebi, mera energetske efikasnosti, do edukacije i podizanja svesti o održivom grejanju.

Analizirajući karakteristike predloženog pristupa za podršku planiranju i dobijene rezultate, može se zaključiti da je primena ovakve metodologije opravdala cilj istraživanja:

- Pobrojane prednosti predložene metodologije obezbedile su holistički pristup u analizi prepreka i njihovih efekata, kao i dometa podsticaja, pre svega političkih instrumenata za ubrzanje tranzicije.
- Interakcije domaćinstava međusobno tokom analiziranog perioda osigurale su efekat evolucije u ponašanju koji na kraju treba da se ogleda u većoj spremnosti domaćinstava da ulože u održivije grejanje.
- Modeliranje pomoću ABM metode pružilo je fleksibilnost u kombinovanju širokog spektra varijabli i njihovu ocenu kroz različite uslove i scenarije, kao i mogućnost integracije sa drugim alatima u procesu energetskeg planiranja.

Korišćenje predloženog pristupa u celini može poslužiti kao podrška u istraživanju polja koje je ostajalo maglovito, neadekvatno istraženo ili potpuno zapostavljeno. Kompleksnost promena koje su predmet istraživanja, kao i reakcija na promene, ne mogu se simulirati u svojoj kompleksnosti, ali se može uočiti trend promena u grejanju domaćinstava i izvući zaključak o kolektivnim obrascima odlučivanja u domaćinstvima u okolnostima koje su simulirane.

Istraživanje o načinu grejanja i stavovima domaćinstava u Republici Srbiji, razvijeni ABM model i predloženi pristup integracije za podršku u energetskeg planiranju predstavljaju originalne doprinose ove disertacije. Oni ispunjavaju uslove naučnog istraživanja – sistematičnost, kontrolisanost,

objektivnost i ponovljivost. Što se tiče dobijenih rezultata u disertaciji, uprkos činjenici da su fokusirani na konkretan slučaj Srbije, oni se mogu posmatrati i u širem kontekstu. Oni mogu poslužiti kao polazna tačka za ispitivanje stanja i perspektive u različitim zemljama u razvoju koje su u početnoj fazi procesa energetske tranzicije. Rezultati istraživanja mogu biti posebno indikativni za grupu zemalja sa sličnim ekonomskim standardom, sličnim navikama potrošača i sličnim klimatskim uslovima, u kojima je upotreba energije za grejanje dominantna u potrošnji energije domaćinstava.

Iako se predstavljeni model oslanja na podatke iz sprovedenog istraživanja i zvanične statističke podatke, stepen segmentacije u sektoru domaćinstava je visok. Razlike vezane za grejanje između domaćinstava su brojne, od vrste sistema, navika, stavova i dr. Iz tog razloga, svaki model zahteva ažuriranje i kalibrisanje. Dalje istraživanje može biti usmereno na smanjenje uočenih neizvesnosti i u tom cilju prikupljanje detaljnijih podataka o sistemima, potrošnji energije i rangu prioriteta koji se postavljaju pred izbor načina grejanja od strane domaćinstva.

Da bi se obezbedila održivost energetske planiranja tranzicije u sektoru domaćinstva, predloženi pristup podrške donosiocima odluka i kreatorima politike ne treba posmatrati kao dovoljan uslov za kvalitetno planiranje. Nesumnjivo, ovaj pristup obezbeđuje analizu aspekata koji su u dosadašnjem planiranju često zapostavljeni i kao takav, predstavlja novu vrednost u energetske planiranju. Održivost planiranja ostvaruje se tek kada se rezultati predloženog pristupa postave u kontekst realnog sistema. To se postiže kada se prethodna iskustva vođenja politike i trenutni organizacioni i materijalni resursi za sprovođenje politike, koji su prirodno koncipirani odozgo na dole, udruže sa rezultatima primene modela koji polazi od krajnjeg korisnika i donošenja odluka na mikro-nivou. Na taj način ostvaruje se potrebna sinergija za oblikovanje održivog plana, koji uvažava širok spektar prepreka, ali i pokretača energetske tranzicije na svim nivoima.

## 9. LITERATURA

- Adepetu, A., 2016., Agent-Based Modeling Framework for Energy Policies, PhD thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario.
- AERS, Agencija za energetiku Republike Srbije, 2020., Troškovi energije za grejanja stambenog prostora,  
[https://www.aers.rs/g/vesti/file/Dokumenti/2020\\_10\\_12%20Grejanje%20CENE%20Okt\\_2020.pdf](https://www.aers.rs/g/vesti/file/Dokumenti/2020_10_12%20Grejanje%20CENE%20Okt_2020.pdf).
- AERS, Agencija za energetiku Republike Srbije, 2021., Izveštaj o stanju u energetsom sektoru Srbije 2020,  
Beograd,  
<https://www.aers.rs/Files/Izvestaji/Godisnji/Izvestaj%20Agencije%202020.pdf>.
- Al Qadi, S., Sodagar, B., Elnokaly, A., 2018., Estimating the heating energy consumption of the residential buildings in Hebron, Palestine, *Journal of Cleaner Production*, 196, 1292-1305, 10.1016/j.jclepro.2018.06.059.
- Alvarez-Galvez, J., 2015., Network Models of Minority Opinion Spreading: Using Agent-Based Modeling to Study Possible Scenarios of Social Contagion, *Social Science Computer Review*, 34 (5), 567-581, doi: 10.1177/0894439315605607.
- Andersen, P.D., Hansen, M., Selin, C., 2021., Stakeholder inclusion in scenario planning—A review of European projects, *Technological Forecasting and Social Change*, 169, 120802, doi: 10.1016/j.techfore.2021.120802.
- Bartiaux, F., Frogneux, N., 2011., Energy “Needs”, Desires, and Wishes: Anthropological Insights and Prospective Views, *Energy, Sustainability and the Environment*, 63-87, doi: 10.1016/B978-0-12-385136-9.10003-8.
- Bayer, B., Geldermann, J., Lauen, L-P., 2017., Agent-based Model of the German Heating Market: Simulations concerning the Use of Wood Pellets and the Sustainability of the Market, *International Conference on the European Energy Market (EEM)*.
- Bazghandi, A. 2012., Techniques, Advantages and Problems of Agent Based Modeling for Traffic Simulation, *International Journal of Computer Science Issues*, 9 (1), 115-119.
- Bhatia, S.C., 2014., Energy resources and their utilisation, *Advanced Renewable Energy Systems*, 1-31, doi: 10.1016/B978-1-78242-269-3.50001-2.
- Biresselioglu, M.E., Demir, M.H., Rashid, A., Solak, B., Ozyorulmaz, E., 2019., What are the preferences of household energy use in Pakistan?: Findings from a national Survey, *Energy & Buildings*, 205, 109538, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109538.
- Bloom, M.J., Manefee, M.K., 1994., Scenario Planning and Contingency Planning, *Public Productivity & Management Review*, 17, doi: 10.2307/3380654.
- Boemi, S.N., Panaras, G., Papadopoulos, A.M., 2017., Residential Heating under Energy Poverty Conditions: A Field Study, *Procedia Environmental Sciences*, 38, 867-874, doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.173.
- Böhringer, C., Cantner, U., Costard, J., Kramkowski, L.V., Gatzen, C., Pietsch, S., 2020., Innovation for the German energy transition - Insights from an expert survey, *Energy Policy*, 144, 111611, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111611.
- Boland, M., Sweeney, M.R., Scallan, E., Harrington, M., Staines, A., 2006., Emerging advantages and drawbacks of telephone surveying in public health research in Ireland and the U.K., *BMC Public Health*, 6 (208), doi: 10.1184/1471-2458-6-208.



- Cajot, S., Peter, M., Bahu, J.M., Guignet, F., Koch, A., Maréchal, F., 2017., Obstacles in energy planning at the urban scale, *Sustainable Cities and Society*, 30, 223-236, doi: 10.1016/j.scs.2017.02.003.
- Čavoški, S.K., 2016., Simulacioni modeli zasnovani na agentima kao podrška odlučivanju u elektronskom poslovanju, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd.
- Chapin, E., 2012., Agent-Based Simulations of Energy Transitions, Conference: Third International Engineering Systems Symposium - Design and Governance in Engineering Systems, Roots, Trunk, Blossoms.
- Chappin, E., Nikolic, I., Yorke-Smith, N., 2020., Agent-based modelling of the social dynamics of energy end use, *Energy and Behaviour*, 321-351, doi: 10.1016/B978-0-12-818567-4.00029-6.
- Csutora, M., Zsoka, A., Harangozo, G., 2021., The Grounded Survey – An integrative mixed method for scrutinizing household energy behavior, *Ecological Economics*, 182, 106907, doi: 10.1016/j.ecolecon.2020.106907.
- Debnath, K.B., Mourshed, M., 2018., Challenges and gaps for energy planning models in the developing-world context, *Nature Energy*, 3, 172-184, doi: 10.1038/s41560-018-0155-7.
- Dincer, I., Rosen, M.A., 2021., *Exergy (Third Edition)*, Elsevier Science, doi: 10.1016/C2016-0-02067-3.
- Dioha, M.O. Kumar, A., 2020., Exploring sustainable energy transitions in sub-Saharan Africa residential sector: The case of Nigeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109510, doi: 10.1016/j.rser.2019.109510.
- Doukas, H., Patlitzianas, K., Kagiannas, A., Psarras, J., 2008., Energy Policy Making: An Old Concept or a Modern Challenge? *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 3, 362-371, doi: 10.1080/15567240701232378.
- Du, P., Zheng, L.Q., Xie, B.C., Mahalingam, A., 2014., Barriers to the adoption of energy-saving technologies in the building sector: A survey study of Jing-jin-tang, China, *Energy Policy*, 75, 206-216, doi: 10.1016/j.enpol.2014.09.025.
- EC, European Commission, 2018., Europe leads the global clean energy transition: Commission welcomes ambitious agreement on further renewable energy development in the EU, [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT\\_18\\_4155](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_18_4155).
- EC, European Commission, 2019a. The European Green Deal, Brussels, [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_en.pdf).
- EC, European Commission, 2019b., Clean energy for all Europeans, European Union, Luxembourg, [https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b4e46873-7528-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc\\_id=Searchresult&WT.ria\\_c=null&WT.ria\\_f=3608&WT.ria\\_ev=search#](https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b4e46873-7528-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc_id=Searchresult&WT.ria_c=null&WT.ria_f=3608&WT.ria_ev=search#).
- EC, European Commission, 2020a., 2050 long-term strategy. [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en).
- EC, European Commission, 2020b., Guidelines for the Implementation of the Green Agenda for the Western Balkans, [https://neighbourhood-enlargement.ec.europa.eu/system/files/2020-10/green\\_agenda\\_for\\_the\\_western\\_balkans\\_en.pdf](https://neighbourhood-enlargement.ec.europa.eu/system/files/2020-10/green_agenda_for_the_western_balkans_en.pdf).

- EC, European Commission, 2020c., Stepping up Europe's 2030 climate ambition - Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people, [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/communication-com2020562-stepping-europe%E2%80%99s-2030-climate-ambition-investing-climate\\_en](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/communication-com2020562-stepping-europe%E2%80%99s-2030-climate-ambition-investing-climate_en).
- EC, European Commission, 2022., Energy, [https://energy.ec.europa.eu/index\\_en](https://energy.ec.europa.eu/index_en).
- Edelenbosch, O. Miu, L., Sachs, J., Hawkes, A., Tavoni, M., 2022., Translating observed household energy behavior to agent-based technology choices in an integrated modeling framework, *iScience*, 25 (3), 103905, doi: 10.1016/j.isci.2022.103905.
- EEA, European Environment Agency, 2019., EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019, <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-small-combustion/view>.
- EIA, Energy Information Administration, 2001., Residential Energy Consumption Survey, Household Questionnaire, <https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2001/pdf/survey-forms/questionnaire.pdf>.
- Elia, A., Kamidelivand, M., Rogan, F., Gallachóir, B.Ó., 2021., Impacts of innovation on renewable energy technology cost reductions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110488, doi: 10.1016/j.rser.2020.110488.
- Elmustapha, H., Hoppe, T., Bressers, H., 2018., Consumer renewable energy technology adoption decision-making; Comparing models on perceived attributes and attitudinal constructs in the case of solar water heaters in Lebanon, *Journal of Cleaner Production*, 172, 347-357, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125036.
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 2009., Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models, EPA, Washington, DC, [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/cred\\_guidance\\_0309.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/cred_guidance_0309.pdf).
- Etaž, 2021., Katalog sistema grejanja, <http://www.etazgrejanje.com/katalog/grejanje/>.
- EU, European Union, 2017., Electrification of the Transport System, European Commission, Brussels, [https://ec.europa.eu/newsroom/horizon2020/document.cfm?doc\\_id=46372](https://ec.europa.eu/newsroom/horizon2020/document.cfm?doc_id=46372).
- Eurostat, 2008., Survey sampling reference guidelines, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/5901961/KS-RA-08-003-EN.PDF/833f7740-0589-47e1-99a5-c14878a2c1a8>.
- Eurostat, 2013., Manual for statistics on energy consumption in households, European Commission, Luxembourg, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/ks-gq-13-003>.
- Eurostat, 2020., Energy consumption and use by households, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20200626-1>.
- Eurostat, 2022a., Energy statistics - quantities, annual data, Energy balances, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>.
- Eurostat, 2022b., Energy consumption in households, [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_consumption\\_in\\_households](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households).
- Eurostat, 2022c., 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).

- Felder, F.A., Andrews, C.J., Hulkower, S.D., 2011., Chapter 2 - Which Energy Future?, poglavlje u: F.P. Sioshansi, *Energy, Sustainability and the Environment*, Butterworth-Heinemann, doi: 10.1016/B978-0-12-385136-9.
- Fetting, C., 2020., *The European Green Deal*, ESDN Office, Vienna, [https://www.esdn.eu/fileadmin/ESDN\\_Reports/ESDN\\_Report\\_2\\_2020.pdf](https://www.esdn.eu/fileadmin/ESDN_Reports/ESDN_Report_2_2020.pdf).
- FHWA, Federal Highway Administration Research and Technology, 2013., *A Primer for Agent-Based Simulation and Modeling in Transportation Applications*, CHAPTER 3: Agent-Based Software Toolkits, <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/ear/13054/004.cfm>.
- Flaherty, C., Filho, W.L., 2013., *Energy Security as a Subset of National Security*, *Global Energy Policy and Security*, 16, 11-25, doi: 10.1007/978-1-4471-5286-6\_2
- Foggia, G.D., 2018. *Energy efficiency measures in buildings for achieving sustainable development goals*, *Heliyon*, 4 (11), e0095, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00953.
- Frankowski, J., Herrero, S.T., 2021., "What is in it for me?" A people-centered account of household energy transition co-benefits in Poland, *Energy Research & Social Science*, 71, 101787, doi: 10.1016/j.erss.2020.101787.
- Gao, L., Hiruta, Y., Ashina, S., 2020., *Promoting renewable energy through willingness to pay for transition to a low carbon society in Japan*, *Renewable Energy*, 162, 818-830, doi: 10.1016/j.renene.2020.08.049.
- Gargiulo, M., Gallachóir, B. Ó, 2013., *Long-term energy models: Principles, characteristics, focus, and limitations*, *Energy and Environment*, 2 (2), 158-177, doi: 10.1002/wene.62.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M.D., Wagner, N., Gorini, R., 2019., *The role of renewable energy in the global energy transformation*, *Energy Strategy Reviews*, 24, 38-50, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- Gilbert, N. Troitzsch, K., 2005., *Simulation for the social scientist*, McGraw-Hill Education, UK.
- Glavonjić, B., 2011., *Consumption of wood fuels in households in Serbia: Present state and possible contribution to the climate change mitigation*, *Thermal Science*, 15, 571-585, doi: 10.2298/TSCII103571G.
- Glavonjić, B., 2017., *Position paper: Status of Using Wood Biomass for Energy Purposes in Serbia*, UNDP Serbia, <http://biomasa.undp.org.rs/wp-content/uploads/2018/11/POSITION-PAPER-Status-of-Using-Wood-Biomass-for-Energy-Purposes-in-Serbia-FINAL.pdf>.
- González, A., Connell, P., 2022., *Developing a renewable energy planning decision-support tool: Stakeholder input guiding strategic decisions*, *Applied Energy*, 312, 118782, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118782.
- GS, Grejanje Srbija, 2021., *Katalog toplotnih pumpi*, [https://www.grejanjesrbija.com/toplotne\\_pumpe.php](https://www.grejanjesrbija.com/toplotne_pumpe.php).
- Hainsch, K., Löffler, K., Burandt, T., Auer, H., del Granado, P.C., Piscicella, P., Zwickl-Bernhard, S., 2022., *Energy transition scenarios: What policies, societal attitudes, and technology developments will realize the EU Green Deal?* *Energy*, 239, Part C, 122067, doi: 10.1016/j.energy.2021.122067.
- Hamilton, S.H., Carmel A.P., Stratford, D.S., Fu, B., Jakeman, A.J., 2022., *Fit-for-purpose environmental modeling: Targeting the intersection of usability, reliability and feasibility*, *Environmental Modelling & Software*, 148, 105278, doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105278.

- Hammond, R.A., 2015., *Considerations and Best Practices in Agent-Based Modeling to Inform Policy*, National Academies Press, Washington D.C., <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK305917/>.
- Hansen, P., Liu, X., Morrison, G.M., 2019., *Agent-based modelling and socio-technical energy transitions: A systematic literature review*, *Energy Research & Social Science*, 49, 41-52, doi: 10.1016/j.erss.2018.10.021.
- Heaps, C.G., 2022., *LEAP: The Low Emissions Analysis Platform*, Software version: 2020.1.56, Stockholm Environment Institute, <https://leap.sei.org>, 2022.
- Herbst, A., Toro, F., Reitze, F., Jochem, E., 2012., *Introduction to Energy Systems Modelling*, Swiss Society of Economics and Statistics, 148 (2), 111-135, doi: 10.1007/BF03399363.
- HERON, HERON project, 2015., *Working Paper on Social, Economic, Cultural and Educational Barriers in Buildings and Transport within each Partner Country - National Reports*, Serbia National Report, [http://heron-project.eu/images/Case\\_Studies/2.1/Annex-7-Serbia.pdf](http://heron-project.eu/images/Case_Studies/2.1/Annex-7-Serbia.pdf).
- Hobbs, B.F., Meier, P., 2000., *Energy Decisions and the Environment*, Science+Business Media, Springer, New York, doi: 10.1007/978-1-4615-4477-7.
- Hu, S., Yan, D., Guo, S., Cui, Y., Dong, B., 2017., *A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China*, *Energy and Buildings*, 148, 366-378, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.03.064.
- IEA, International Energy Agency, 2014., *World energy outlook*, <http://www.iea.org/weo>.
- INOGATE, 2014., *Survey on energy consumption in household sector – data collection and compilation*, ITS Technical Assistance Mission to Ukraine, Kiev, [https://www.who.int/airpollution/household/1\\_Harmonized\\_household\\_energy\\_survey\\_questions-list\\_format\\_final\\_Dec2018.pdf](https://www.who.int/airpollution/household/1_Harmonized_household_energy_survey_questions-list_format_final_Dec2018.pdf).
- IRENA, International Renewable Energy Agency, 2018a., *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*, Abu Dhabi, [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA\\_Global\\_Energy\\_Transformation\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf).
- IRENA, International Renewable Energy Agency, 2018b., *A Roadmap to 2050*, [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA\\_Report\\_GET\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf).
- Irwin, M., Wang, Z., 2017., *Dynamic Systems Modeling*, *The International Encyclopedia of Communication Research Methods*, doi: 10.1002/9781118901731.iecrm0074.
- Jackson, J.C., Rand, D., Lewis, K., Irwin, N.M., Kurt, G., 2017., *Agent-based Modeling: A Guide for Social Psychologists*, *Social Psychological & Personality Science*, 8 (4), 381-395, doi: 10.1177/1948550617691100.
- Jaeger, B., Machry, P., 2014., *Energy transition and challenges for the 21th century*, Ministerial Roundtable of the World Energy Council, 337-374, <https://www.ufrgs.br/ufrgsmun/2014/files/WEC1.pdf>.
- Jakeman, A.J., Letcher, R.A., Norton, J.P., 2006., *Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models*, *Environmental Modelling & Software*, 21 (5), 602-614, doi: 10.1016/j.envsoft.2006.01.004.
- Jennings, G.R., 2005., *Business Research, Social Science Methods Used*, *Encyclopedia of Social Measurement*, 219-290, doi: 10.1016/B0-12-369398-5/00270-X.

- Jensen, T., Holtz, G., Chappin, E., 2015., Agent-based assessment framework for behavior-changing feedback devices: Spreading of devices and heating behavior, *Technological Forecasting and Social Change*, Technological Forecasting and Social Change, 98, 105-119, doi: 10.1016/j.techfore.2015.06.006.
- Jiang, H., Yao, R., Han, S., Du, C., Yu, W., Chen, S., Li, B., Yu, H., Li, N., Peng, J., Li, B. 2020., How do urban residents use energy for winter heating at home? A large-scale survey in the hot summer and cold winter climate zone in the Yangtze River region, *Energy & Buildings*, 223, 110131, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110131.
- Johannsen, R.M. Østergaard, P.A., Maya-Drysdale, D., Mouritsen, L.K.E., 2021., Designing Tools for Energy System Scenario Making in Municipal Energy Planning, *Energies*, 14 (5), 1442, doi: 10.3390/en14051442.
- Jones, D., 2021., EU Power Sector in 2020, <https://ember-climate.org/insights/research/eu-power-sector-2020/>.
- Jovanović. M., Bakić, V., Vučićević B.S., Turanjanin, V.M., 2019., Analysis of Different Scenarios and Sustainability Measurement in the District Heating sector in Serbia, *Thermal Science* , 23 (3B), 2085-2096, doi: 10.2298/TSCI181009298J.
- Jovanović Popović, M., Ignjatović, D., Radivojević, A., Rajčić, A., Đukanović, Lj., Ćurković-Ignjatović, N., Nedić, M., 2013., Nacionalna tipologija stambenih zgrada Srbije, Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- Jovanovski, B., Minovski, R., Voessner, S., Lichtenegger, G. 2012., Combined system dynamics and discrete event simulations - overview of hybrid simulation models, *Journal of Applied Engineering Science*, 10, 135-142, doi: 10.5937/jaes10-2512.
- Kachirayil, F., Weinand, J.M., Scheller, F., McKenna, R., 2022., Reviewing local and integrated energy system models: insights into flexibility and robustness challenges, *Applied Energy*, 324, 119666, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119666.
- Kadian, R., Dahiya, R.P., Garg, H.P., 2007., Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi, *Energy Policy*, 35 (12), 6195-6211, doi: 10.1016/j.enpol.2007.07.014.
- Kane, T., Firth, S.K., Hassan, T.M., Dimitriou, V., Heating behaviour in English homes: An assessment of indirect calculation methods, 2017., *Energy and Buildings*, 148, 89-105, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.059.
- Karpinska, L., Śmiech S., 2021., Will energy transition in Poland increase the extent and depth of energy poverty?, *Journal of Cleaner Production*, 328, 129480, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129480.
- Karytsas, S., Polyzou, O., Karytsas, C., 2019., Factors affecting willingness to adopt and willingness to pay for a residential hybrid system that provides heating/cooling and domestic hot water, *Renewable Energy*, 142, 591-603, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.108.
- Kelly, J.A., Clinch, J.P., Kelleher, L., Shahab, S. 2020., Enabling a just transition: A composite indicator for assessing home-heating energy-poverty risk and the impact of environmental policy measures, *Energy Policy* , 146, 111791, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111791.
- Kim, H.H., Lim, S.Y., Yoo, S.H., 2019., Residential Consumers' Willingness to Pay Price Premium for Renewable Heat in South Korea, *Sustainability*, 11 (5), 1234, doi: 10.3390/su11051234.
- Klein, M., 2020., Agent-Based Modeling and Simulation of Renewable Energy Market Integration – The Case of PV-Battery Systems, PhD thesis, Universität Stuttgart, Stuttgart.

- Knobloch, F., Pollitt, H., Chewpreecha, U., Lewney, R., Huijbregts, M., Mercure, J., 2021., FTT:Heat — A simulation model for technological change in the European residential heating sector, *Energy Policy*, 153, 112249, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112249.
- Kotz, S., Read, C.B., Balakrishnan, N., Vidakovic, B., Johnson, N.L., 2004., *Encyclopedia of Statistical Sciences*, John Wiley & Sons, Inc., doi: 10.1002/0471667196.
- Kowalska-Pyzalska, A., 2017., Willingness to pay for green energy: An agent-based model in NetLogo platform 4th International Conference on the European Energy Market (EEM), Dresden, 1-6, doi: 10.1109/EEM.2017.7981943.
- Kubba, S., 2017., *Handbook of Green Building Design and Construction*, Chapter Nine - Impact of Energy and Atmosphere, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann.
- Lee, J. Filatova, T., Ligmann-Zielinska, A., Hassani-Mahmooui, B., Stonedahl, F., Lorscheid, I., Voinov, A., Polhill, G., Sun, Z. Parker, D., 2015., The Complexities of Agent-Based Modeling Output Analysis, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18 (4), doi: 10.18564/jasss.2897.
- Lee, T., Yao, R., Coker, P., 2014., An analysis of UK policies for domestic energy reduction using an agent based tool, *Energy Policy*, 66, 267-279, doi: 10.1016/j.enpol.2013.11.004.
- Leonelli, M., 2021., *Simulation and Modelling to Understand Change*, School of Human Sciences and Technology at IE University, Madrid, [https://bookdown.org/manuele\\_leonelli/SimBook/](https://bookdown.org/manuele_leonelli/SimBook/).
- Li, X., Yao, R., 2021., Modelling heating and cooling energy demand for building stock using a hybrid approach, *Energy & Buildings*, 235, 110740, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110740.
- Liu, W., Best, F., Crijs-Graus, W., 2021., Exploring the pathways towards a sustainable heating system – A case study of Utrecht in the Netherlands, *Journal of Cleaner Production*, 280 (2), 125036, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125036.
- Lopion, P., Markewitz, P., Robinius, M., Stolten, D., 2018., A review of current challenges and trends in energy systems modeling, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 156-166, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.045.
- Lund, H., 2014., *Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions*, Academic Press, doi: 10.1016/C2012-0-07273-0.
- Macal, C.M., 2018., Tutorial on agent-based modeling and simulation: ABM design for the zombie apocalypse, *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, 207-221, <http://simulation.su/uploads/files/default/2018-macal-1.pdf>.
- Magnetron, 2021., Katalog sistema grejanja, <http://www.magnetronpromet.rs/proizvodi/klima-uredjaji-i-grejanje/grejanje/ta-peci>.
- Malik, C., Singhal, N., 2017., Consumer Environmental Attitude and Willingness to Purchase Environmentally Friendly Products: An SEM Approach, *Vision: The Journal of Business Perspective*, 21 (2), 152-161, doi: 10.1177/0972262917700991.
- Martinez, J., 2021., Great Smog of London, *Encyclopedia Britannica*, <https://www.britannica.com/event/Great-Smog-of-London>.
- Maslow, A.H., 1943., A Theory of Human Motivation, *Psychological Review*, 50 (4), 430-437.
- Mata Perez i dr., Mata Perez, M.E., Scholten, D., Stegen, K.S., 2019., The multi-speed energy transition in Europe: Opportunities and challenges for EU energy security, *Energy Strategy Reviews*, 26, 100415, doi: 10.1016/j.esr.2019.100415.

- McGookin, C., Gallachóir, B.Ó., Byrne, E., 2021., Participatory methods in energy system modelling and planning – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111504, doi: 10.1016/j.rser.2021.111504.
- MEI, Ministarstvo za evropske integracije, 2013., Sporazum o stabilizaciji i pridruživanju, <https://www.mei.gov.rs/srl/srbija-i-eu/sporazum-o-stabilizaciji-i-pridruzivanju/>.
- Mercure, J.F., Salas, P., Vercoulen, P., Semieniuk, G., Lam, A., Pollitt, H., Holden, P.B., Vakilifard, N., Chewpreecha, U., Edwards, N.R., Vinuales, J.E., Reframing incentives for climate policy action, *Nature energy*, 6, 1133-1143, doi: 10.1038/s41560-021-00934-2.
- MERP, Ministry of the Environment of the Republic of Poland, 2017., Addressing Black Carbon and Other Emissions from Combined Cooking+Heating and Coal Heating Stoves, Warsaw, <http://warsawstovesummit.org/wp-content/uploads/2017/03/WP1-Problem-definition-combined-cooking-and-heating-final-0617.pdf>.
- Michelsen, C.C., Madlener, R., 2016., Switching from fossil fuel to renewables in residential heating systems: An empirical study of homeowners' decisions in Germany, *Energy Policy*, 89, 95-105, doi: 10.1016/j.enpol.2015.11.018.
- Mirakyan, A., De Guio, R., 2013., Integrated energy planning in cities and territories: A review of methods and tools, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 289-297, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.033.
- Miu, L.M., Mazur, C.M., van Dam, K.H., Lambert, R.S.C., Hawkes, A., Shah, N., 2019., Going smart, staying confused: Perceptions and use of smart thermostats in British homes, *Energy Research & Social Science*, 57, 101228, doi: 10.1016/j.erss.2019.101228.
- Moon, J.W., Han, S.H., 2011., Thermostat strategies impact on energy consumption in residential buildings, *Energy and Buildings*, 43, 338-346, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.09.024.
- Naef, P., Sahakian, M., Goggins, G., 2019., Conclusion: Comparing Household Energy Use Across Europe — Uncovering Opportunities for Sustainable Transformation, poglavlje u knjizi: Fahy, F., *Energy Demand Challenges in Europe*. Palgrave Pivot, Cham.
- Nava-Guerrero, G., Hansen, H.H., Korevaar, G., Lukszo, Z., 2021., The effect of group decisions in heat transitions: An agent-based approach, *Energy Policy*, 156, 112306, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112306.
- Niamir, L., Ivanova, O., Filatova, T., Voinov, A., Bressers, H., 2020., Demand-side solutions for climate mitigation: Bottom-up drivers of household energy behavior change in the Netherlands and Spain, *Energy Research & Social Science*, 62, 101356, doi: 10.1016/j.erss.2019.101356.
- Nieves, J.A., Aristizábal, A.J., Dyer, I., Báez, O., Ospina, D.H., 2019., Energy demand and greenhouse gas emissions analysis in Colombia: A LEAP model application, *Energy*, 169, 380-397, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.051.
- NRC, National Research Council, 2007., *Models in Environmental Regulatory Decision Making*, National Academies Press, Washington, D.C.
- OECD, Organization for Economic Co-operation and Development, 2019., *OECD Affordable Housing Database, HC1.3. Ability of households to keep dwelling warm*, <https://www.oecd.org/els/family/HC1-3-Ability-of-households-keep-dwelling-warm>.
- Olave, M.S., Vargas-Payera, S., 2020., Chapter 12 - Environmental impact assessment and public participation of geothermal energy projects: the cases of Chile, Costa Rica, Colombia, and

- Mexico, poglavlje u knjizi: L.N. Guimarães, *The Regulation and Policy of Latin American Energy Transitions*, Elsevier, doi: 10.1016/B978-0-12-819521-5.00012-7.
- Pan, L., Liu, P., Li, Z., Wang, Y., 2018., A dynamic input–output method for energy system modeling and analysis, *Chemical Engineering Research and Design*, 131, 183-192, doi: 10.1016/j.cherd.2017.11.032.
- Paraschiv Lizica, S., Paraschiv, S., Ion, I.V., 2017., Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation, *Energy Procedia*, 128, 393-399, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.044.
- Parrish, B., Heptonstall, P., Gross, R., Sovacool, B.K., 2020., A systematic review of motivations, enablers and barriers for consumer engagement with residential demand response, *Energy Policy*, 138, 111221, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111221.
- Pavlović, B., Ivezić, D., Živković, M., 2021., State and perspective of individual household heating in Serbia: A survey-based study, *Energy and Buildings*, 247, 111128, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111128.
- Pavlović, B., Ivezić, D., Živković, M., 2022., Transition pathways of household heating in Serbia: Analysis based on an agent-based model, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, 112506, doi: 10.1016/j.rser.2022.112506.
- Pleeging, E., van Exel, J., Burger, M.J., Stavropoulos, S., 2021., Hope for the future and willingness to pay for sustainable energy, *Ecological Economics*, 181, 106900, doi: 10.1016/j.ecolecon.2020.106900.
- Pokorni, S., 2005., Statistička analiza bezbednosti tehničkih sistema u toku eksploatacije, *Vojnotehnički glasnik*, 6, 521-533.
- Pratiwi, S.I., Pratomo, L.A., 2018., Antecedents of willingness to pay for green products, *The 4th International Seminar on Sustainable Urban Development*, 106, doi: 10.1088/1755-1315/106/1/012093.
- Prina, M.G., Manzolini, G., Moser, D., Nastasi, B., Sparber, W., 2020., Classification and challenges of bottom-up energy system models - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109917, doi: 10.1016/j.rser.2020.109917.
- Rai, V., Henry, A.D., 2016., Agent-based modelling of consumer energy choices, *Nature Climate Change*, 6, 556–562, doi: 10.1038/NCLIMATE2967.
- Rieder, W.G., 2003., *Simulation and Modeling*, poglavlje u knjizi: Meyers, R.A., *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, 815-835, Academic Press, doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00692-X.
- Robinson, D., 2022., *Current Energy Crises, the Energy Transition and the Design of Electricity Markets*, Oxford Institute for Energy Studies, <https://a9w7k6q9.stackpathcdn.com/wpcms/wp-content/uploads/2022/08/Current-Energy-Crises-the-Energy-Transition-and-the-Design-of-Electricity-Markets.pdf>.
- Rosenow, J., Kern, F., Rogge, K., 2017., The need for comprehensive and well targeted instrument mixes to stimulate energy transitions: The case of energy efficiency policy, *Energy Research & Social Science*, 33, 95-104, doi: 10.1016/j.erss.2017.09.013, 2017.
- Rott, B., Specht, B., Knipping, C., 2021., A descriptive phase model of problem-solving processes, *ZDM Mathematics Education*, 53, 737-752, doi: 10.1007/s11858-021-01244-3.
- RS, Republika Srbija, 2006., Ugovor o osnivanju Energetske zajednice između Evropske zajednice i Republike Albanije, Republike Bugarske, BiH, Republike Hrvatske, BJR Makedonije,



- Republike Crne Gore, Rumunije, Republike Srbije i Privremene Misije Ujedinjenih nacija na Kosovu, Službeni glasnik br. 62/2006, Beograd.
- RS, Republika Srbija, 2015., Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, Službeni glasnik RS, 101/2015, Beograd.
- RS, Republika Srbija, 2021a., Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, Službeni glasnik RS br. 40/21, Beograd.
- RS, Republika Srbija, 2021b., Zakon o energetskej efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije, Službeni glasnik RS br. 40/21, Beograd.
- RS, Republika Srbija, 2021c., Zakon o klimatskim promenama, Službeni glasnik RS br. 26/2021, Beograd.
- RS, Republika Srbija, 2021d., Zakon o energetici, Službeni glasnik RS, br. 145/2014, 95/2018 – dr. zakon i 40/2021, Beograd.
- Rubino, A., Sapio, A., La Scala, M., 2021., Handbook of Energy Economics and Policy, Academic Press, doi: 10.1016/C2017-0-01718-4.
- Rue du Can, S., Khandekar, A., Abhyankar, N., Phadke, A., Zheng Khanna, N., Fridley, D., Zhou, N., 2019., Modeling India's energy future using a bottom-up approach, Applied Energy, 238, 1108-1125, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.065.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2013., Popis stanovništva, domaćinstava i stanova 2011. u Republici Srbiji, RZS, Beograd.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2019. Energetski bilans 2017, <https://www.stat.gov.rs/media/3994/ukupan-energetski-bilans-2017.pdf>.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2020a., Anketa o potrošnji domaćinstava, RZS, Beograd.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2020b., Statistički godišnjak, <https://publikacije.stat.gov.rs/G2020/Pdf/G20202053.pdf>.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2021a., Potrošnja energije u domaćinstvima u Republici Srbiji. Beograd.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2021b., Procena stanovništva, 2020, <https://publikacije.stat.gov.rs/G2021/Pdf/G20211181.pdf>.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2021c., RZS, Beograd, Regioni u Republici Srbiji, <https://publikacije.stat.gov.rs/G2021/Pdf/G202126001.pdf>.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2022a., Energetski bilans 2020, <https://publikacije.stat.gov.rs/G2022/Pdf/G20225681.pdf>.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2022b., Uporedni pregled broja stanova, Popis 2011, <https://www.stat.gov.rs/sr-Latn/oblasti/popis/popis-2011/popisni-podaci-eksel-tabele>.
- RZS, Republički zavod za statistiku, 2022c., Prosečne zarade po zaposlenom, januar 2022, <https://publikacije.stat.gov.rs/G2022/HTML/G20221078.html>.
- Salgado, M., Gilbert, N. 2013., Agent based modelling, poglavlje u knjizi: Teo, T., Handbook of Quantitative Methods for Educational Research, 247-265, doi: 10.1007/978-94-6209-404-8\_12.

- SEI, Stockholm Environment Institute, 2017., The Long-range Energy Alternatives Planning - Integrated Benefits Calculator (LEAP-IBC), Stockholm, Sweden, <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/SEI-Factsheet-LEAP-IBC-2.pdf>.
- Simon, F., 2021., Industry: European electricity grid can handle 50 million heat pumps, Euractiv, <https://www.euractiv.com/section/energy/news/industry-european-electricity-grid-can-handle-50-million-heat-pumps/>.
- Singh, H.V., Bocca, R., Gomez, P., Dahlke, S., Bazilian, M., 2019., The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy system, *Energy Strategy Reviews*, 26, 100382, doi: 10.1016/j.esr.2019.100382.
- Smaldino, P.E., Janssen, M.A., Hillis, V., Bednar, J., 2017., Adoption as a social marker: Innovation diffusion with outgroup aversion, *The Journal of Mathematical Sociology*, 41 (1), 26-45, doi: 10.1080/0022250X.2016.1250083.
- Smil, V., 2010., *Energy transitions: history, requirements, prospects*. ABC-CLIO, Santa Barbara, California.
- Smil, V., 2017., *Energy and Civilization. A History*, MIT Press, Cambridge.
- Sokołowski, M.M., Heffron, R.J., 2022., Defining and conceptualising energy policy failure: The when, where, why, and how, *Energy Policy*, 161, 112745, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112745
- Solomon, B.D., Krishna, K., 2011., The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook. *Energy Policy*, 39(11), 7422-7431, doi: 10.1016/j.enpol.2011.09.009.
- Sopha, B.M., Klöckner C.A., Hertwich, E.G., 2011., Exploring policy options for a transition to sustainable heating system diffusion using an agent-based simulation, *Energy Policy*, 9, 2722-2729, doi: 10.1016/j.enpol.2011.02.041.
- Sopha, B.M., Klöckner, C.A., Hertwich, E.G., 2013., Adoption and diffusion of heating systems in Norway: Coupling agent-based modeling with empirical research, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 8, 42-61, doi: 10.1016/j.eist.2013.06.001.
- Sopha, B.M., Klöckner, C.A., Febrianti, D., 2017., Using agent-based modeling to explore policy options supporting adoption of natural gas vehicles in Indonesia, *Journal of Environmental Psychology*, 52, 149-165, doi: 10.1016/j.jenvp.2016.06.002.
- Sørensen, B., 2017., *Renewable Energy (Fifth Edition)*, Academic Press, doi: 10.1016/B978-0-12-804567-1.00006-2.
- Sovacool, B., 2016., How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions, *Energy Research & Social Science*, 13, 202-215, doi: 10.1016/j.erss.2015.12.020.
- Sovacool, B., Martiskainen, M., 2020., Hot transformations: Governing rapid and deep household heating transitions in China, Denmark, Finland and the United Kingdom, *Energy Policy*, 139, 111330, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111330.
- Stigka, E.K., Paravantis, J.A., Mihalakakou, G.K., 2014., Social acceptance of renewable energy sources: A review of contingent valuation applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 100-106, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.026.
- Süsser, D., Ceglarz, A., Gaschnig, H., Stavrakas, V., Flamos, A., Giannakidis, G., Lilliestam, J. 2021., Model-based policymaking or policy-based modelling? How energy models and energy policy interact, *Energy Research & Social Science*, 78, 101984, doi: 10.1016/j.erss.2021.101984.

- Szolnoki, G., Hoffmann, D., 2013., Online, face-to-face and telephone surveys — Comparing different sampling methods in wine consumer research, *Wine Economics and Policy*, 2 (2), 57-66, doi: 10.1016/j.wep.2013.10.001.
- Tang, L., Wang, X., Wang, Xi., Shao, C., Liu, S., Tian, S., 2019., Long-term electricity consumption forecasting based on expert prediction and fuzzy Bayesian theory, *Energy*, 167, 1144-1154, doi: 10.1016/j.energy.2018.10.073.
- Terrados, J., Almonacid, G., Aguilera, J., 2010., *Energy Planning: a Sustainable Approach*, poglavlje u knjizi: Nathwani, J., Ng, A., *Paths to Sustainable Energy*, IntechOpen, London, doi: 10.5772/12847.
- Tesfatsion, L., 2022., *Agent-Based Computational Economics*, <https://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm>.
- Tian, S., Chang, S., 2020., An agent-based model of household energy consumption, *Journal of Cleaner Production*, 242, 118378, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118378.
- Tian, S., Lu, Y., Ge, X., Zheng, Y., 2021., An agent-based modeling approach combined with deep learning method in simulating household energy consumption, *Journal of Building Engineering*, 43, 103210, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103210.
- Țîbulcă, I.L., 2021., Reducing Air Pollution: Are Environmental Taxes Enough to Help the EU Member States Reach Climate Neutrality by 2050? *Polish Journal Environmental Studies*, 30, 4205-4218, doi: 10.15244/pjoes/132621.
- TOPS, Poslovno udruženje Toplane Srbije, 2021., Izveštaj o radu sistema daljinskog grejanja u Republici Srbiji za 2020, Šabac, [https://www.toplanesrbije.org.rs/uploads/ck\\_editor/files/Godisnji%20izvestaj%20pdf%2020%20final.pdf](https://www.toplanesrbije.org.rs/uploads/ck_editor/files/Godisnji%20izvestaj%20pdf%2020%20final.pdf).
- Tovar-Facio, J., Martin, M., Ponce-Ortega, J.M., 2021., Sustainable energy transition: modeling and optimization, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100661, doi: 10.1016/j.coche.2020.100661.
- UNDP, United Nations Development Programme in Serbia, 2019., Joint Message to the Government of Serbia on Climate Change, Belgrade, [https://www.rs.undp.org/content/serbia/en/home/presscenter/articles/2019/zajedni\\_ku-poruku-o-klimatskim-promenama-vladi-srbije.html#:~:text=Serbia%20has%20pledged%20to%20reduce,Contribution%20under%20the%20Paris%20Agreement.&text=We%20encourage%2](https://www.rs.undp.org/content/serbia/en/home/presscenter/articles/2019/zajedni_ku-poruku-o-klimatskim-promenama-vladi-srbije.html#:~:text=Serbia%20has%20pledged%20to%20reduce,Contribution%20under%20the%20Paris%20Agreement.&text=We%20encourage%2).
- UN, UN General Assembly, 1994., United Nations Framework Convention on Climate Change, resolution / adopted by the General Assembly, A/RES/48/189. <https://www.refworld.org/docid/3b00f2770.html>.
- UN, United Nations, 1997., Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.
- UN, United Nations, 2015., Paris Agreement, [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17853paris\\_agreement.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17853paris_agreement.pdf).
- UN, United Nations, 2012., Rio+20, UN Conference on Sustainable Development, Outcome of the Conference, Rio de Janeiro, <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/13662/N1238164.pdf?sequence=1&amp%3BisAllowed=>.

- Valkenburg, G., Gracceva, F., 2016., Chapter 8 - Towards Governance of Energy Security, poglavlje u knjizi: Lombardi, M., Gruenig, P., Low-carbon Energy Security from a European Perspective, Academic Press, doi: 10.1016/B978-0-12-802970-1.00008-5.
- Waisman, H., Bataille, C., Winkler, H., Jotzo, F., Shukla, P., Colombier, M., 2019., A pathway design framework for national low greenhouse gas emission development strategies, *Nature Climate Change*, 9, doi: 10.1038/s41558-019-0442-8.
- Wang, Z., Zhao, Z., Lin, B., Zhu, Y., Ouyang, Q., 2015., Residential heating energy consumption modeling through a bottom-up approach for China's Hot Summer – Cold Winter climatic region, *Energy and Buildings*, 109, 65-74, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.09.057.
- Weissman, S., Constantine, S., Hernandez, P., Gallagher, C., 2016., Natural Gas as a Bridge Fuel, Center for Sustainable Energy, San Diego, [https://energycenter.org/sites/default/files/docs/nav/policy/research-and-reports/Natural\\_Gas\\_Bridge\\_Fuel.pdf](https://energycenter.org/sites/default/files/docs/nav/policy/research-and-reports/Natural_Gas_Bridge_Fuel.pdf).
- WHO, World Health Organization, 2019., Harmonized survey questions for monitoring household energy use and SDG indicators 7.1.1 and 7.1.2., [https://www.who.int/airpollution/household/1\\_Harmonized\\_household\\_energy\\_survey\\_questions-list\\_format\\_final\\_Dec2018.pdf](https://www.who.int/airpollution/household/1_Harmonized_household_energy_survey_questions-list_format_final_Dec2018.pdf).
- Wilensky, U., 1999., NetLogo, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- Wong, J.B., Zhang, Q., 2022., Impact of carbon tax on electricity prices and behaviour, *Finance Research Letters*, 44, 102098, doi: 10.1016/j.frl.2021.102098.
- Yazdanie, M., Orehounig, K., 2021., Advancing urban energy system planning and modeling approaches: Gaps and solutions in perspective, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110607, doi: 10.1016/j.rser.2020.110607.
- Zhou, Z., Wang, C., Sun, X., Gao, F., Feng, W., Zillante, G., 2018., Heating energy saving potential from building envelope design and operation optimization in residential buildings: A case study in northern China, *Journal of Cleaner Production*, 174, 413-423, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.237.
- Živković, M., Ivezić, D., 2019., Osnove energetike, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
- Živković, M., Pereverza, K., Pasichnyi, O., Madžarević, A., Ivezić, D., Kordas, O., 2016., Exploring scenarios for more sustainable heating: The case of Niš, Serbia, *Energy*, 115, 1758-1770, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.034.
- Zlatanović, D., 2010., Modeli sistemske dinamike u rešavanju upravljačkih problema, *Ekonomski horizonti*, 23-36., doi: 10.5937/ekonhor1201023Z.

## 10. SPISAK SLIKA I TABELA

### Slike

Slika 1. Finalna potrošnja energije za energetske svrhe po energentima – EU 27 (Eurostat, 2022a).....	9
Slika 2. Udeo fosilnih goriva u ukupnoj raspoloživoj energiji – EU 27 (Eurostat, 2022a).....	10
Slika 3. Bruto proizvodnja električne energije – EU 27 (Eurostat, 2022a) .....	10
Slika 4. Udeo OIE u proizvodnji električne energije – EU 27 (Eurostat, 2022a).....	11
Slika 5. Energetski intenzitet ekonomije – EU 27 (Eurostat, 2022a) .....	12
Slika 6. Energetski intenzitet ekonomije prema PKM – EU 27 (Eurostat, 2022a).....	12
Slika 7. Finalna potrošnja energije za energetske svrhe po energentima – Srbija (Eurostat, 2022a).....	14
Slika 8. Udeo fosilnih goriva u ukupnoj raspoloživoj energiji – Srbija (Eurostat, 2022a) .....	14
Slika 9. Proizvodnja električne energije – Srbija (Eurostat, 2022a) .....	15
Slika 10. Udeo OIE u proizvodnji električne energije – Srbija (Eurostat, 2022a).....	16
Slika 11. Energetski intenzitet ekonomije – Srbija (Eurostat, 2022a) .....	17
Slika 12. Energetski intenzitet ekonomije prema PKM – Srbija (Eurostat, 2022a).....	17
Slika 13. Višeslojna perspektiva u planiranju energetske tranzicije (Hansen i dr., 2019).....	20
Slika 14. Pristup „odozdo na gore“ u ABM modelima u procesu modelovanja realnih sistema (Čavoški, 2016) .....	28
Slika 15. Tipičan agent u ABM modelu (Macal, 2018).....	32
Slika 16. Osnovni koraci u istraživanju domaćinstava .....	40
Slika 17. Statistički regioni u Srbiji (RZS, 2020b).....	43
Slika 18. Domaćinstva prema grejnoj površini [ $m^2$ ].....	44
Slika 19. Domaćinstva prema periodu izgradnje .....	45
Slika 20. Broj članova domaćinstva.....	45
Slika 21. Sprovedene mere energetske efikasnosti na objektu u poslednjih 10 godina.....	46
Slika 22. Struktura domaćinstava sa sprovedenim merama energetske efikasnosti .....	46
Slika 23. Struktura domaćinstava prema dominantnim energentima .....	47
Slika 24. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja (individualni sistemi + daljinsko grejanje).....	47
Slika 25. Konfiguracija individualnih sistema grejanja .....	48
Slika 26. Struktura domaćinstava sa centralnim grejanjem .....	48
Slika 27. Struktura domaćinstava sa lokalnim grejnim uređajima/telima .....	49
Slika 28. Struktura domaćinstava grejne površine 0 - 49 $m^2$ .....	49
Slika 29. Starost sistema grejanja .....	50
Slika 30. Struktura domaćinstava prema tipu sistema grejanja .....	51
Slika 31. Učestalost kontrole potrošnje energije u domaćinstvu .....	51
Slika 32. Prepreke za energetske tranzicije ka održivijem grejanju .....	52
Slika 33. Struktura domaćinstava koja su navela nedostatak novca kao najveću prepreku.....	52
Slika 34. Spremnost da se investira u održivije grejanje .....	53
Slika 35. Subvencija koja bi motivisala domaćinstvo da zameni postojeći sistem grejanja.....	53
Slika 36. Rang prioriteta kod izbora grejanja .....	54
Slika 37. Uticaj okruženja na izbor načina grejanja domaćinstva .....	54
Slika 38. Uticaj informacija o zagađenju vazduha na izbor načina grejanja domaćinstva .....	55
Slika 39. Dijagram toka ABM modela.....	64

Slika 40. Maslovljeva piramida ljudskih potreba (Bartiaux, 2011) .....	65
Slika 41. Prikaz ulaznih parametara domaćinstva u NetLogo programu.....	70
Slika 42. Vizuelni prikaz ABM simulacionog modela u NetLogo softveru u 2020. godini (a) i 2050. godini (b).....	71
Slika 43. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Ref. scenario) .....	72
Slika 44. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Scenario 2) .....	72
Slika 45. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Scenario 3) .....	73
Slika 46. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Scenario 4) .....	73
Slika 47. Struktura domaćinstava prema načinu grejanja do 2050. godine (Scenario 5) .....	74
Slika 48. Godišnje CO <sub>2</sub> emisije od individualnog grejanja po domaćinstvu .....	75
Slika 49. Godišnje NO <sub>x</sub> emisije od individualnog grejanja po domaćinstvu .....	76
Slika 50. Godišnje CO emisije od individualnog grejanja po domaćinstvu .....	76
Slika 51. Mesto i uloga integrativnog pristupa u vođenju politike energetske tranzicije .....	81
Slika 52. Okvir predloženog integrativnog pristupa .....	82
Slika 53. Finalna potrošnja za Referentni scenario – slučaj BAU .....	85
Slika 54. Finalna potrošnja za Referentni scenario – instrument zabrane sagorevanja u urbanim sredinama .....	85
Slika 55. Finalna potrošnja za Referentni scenario – instrument subvencije za efikasnije sisteme grejanja .....	86
Slika 56. Finalna potrošnja za Referentni scenario – kombinacija zabrane i subvencija .....	87
Slika 57. Finalna potrošnja za Scenario 4 – kombinacija zabrane i subvencija.....	88
Slika 58. Finalna potrošnja za Referentni scenario + energetska rehabilitacija – slučaj BAU.....	88
Slika 59. Finalna potrošnja za Scenario 4 (kombinacija zabrane i subvencija) + energetska rehabilitacija .....	89

**Tabele**

Tabela 1. Osnovni koraci u procesu modeliranja (EPA, 2009) .....	22
Tabela 2. Poređenje platformi za modeliranje ABM modela (Salgado i Gilbert, 2013) .....	34
Tabela 3. Pregled istraživanja o potrošnji energije u domaćinstvima.....	40
Tabela 4. Sadržaj ankete po glavnim oblastima.....	42
Tabela 5. Ostale osobine individualnih sistema grejanja.....	50
Tabela 6. Opis ABM modela .....	60
Tabela 7. Izvori podataka.....	61
Tabela 8. Ulazni parametri za sisteme grejanja .....	63
Tabela 9. Opis instrumenata energetske politike .....	68
Tabela 10. Analiza osetljivosti - parametri .....	69
Tabela 11. Ulazni podaci za tip naselja i grejnu površinu .....	84
Tabela 12. Projekcije finalne potrošnje energije u domaćinstvima za grejanje (u kten) .....	89

## **11. SPISAK PRILOGA**

- Prilog 1 - Kodiranje procesa donošenja odluka o kupovini novog sistema grejanja – slučaj izbora toplotne pumpe
- Prilog 2 - Kodiranje promene parametra „Spremnost da se plati više“ pod uticajem socijalne mreže



## Prilog 1 - Kodiranje procesa donošenja odluka o kupovini novog sistema grejanja – slučaj izbora toplotne pumpe

```

1. ;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
2. ;;; domaćinstvo će kupiti TOPLOTNU PUMPU "6" pod sledećim uslovima ;;;
3. ;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
4. ;;; limit 1 - Domaćinstvo do 50m2
5.   if modern-system = 0 and urban-rural = 1 and unwilling-to-change = 0
6.     and house-size = 1 and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-1) * wtp < ((wood-
7.       price * energy-kwh/y / 0.55) + wood-s-1)
8.     and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-1) * wtp < ((el-price-l * energy-
9.       kwh/y / 1) + el-s-1)
10.    and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-1) * wtp < ((gas-price * energy-
11.      kwh/y / 0.9) + gas-s-1 + gas-connection)
12.    and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-1) * wtp < ((coal-price * energy-
13.      kwh/y / 0.55) + coal-s-1)
14.    and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-1) * wtp < ((pellet-price * energy-
15.      kwh/y / 0.8) + pellet-s-1) * wtp
16.    [set heat-system 6
17.      set color 15
18.      set system-age 0
19.      set system-type 61
20.      set system-effic 3
21.      set CO2emission-factor electricity-co2
22.      set COemission-factor 0
23.      set NOXemission-factor 0
24.      set energy-total energy-kwh/y / system-effic
25.      set CO2total-emission energy-total * CO2emission-factor
26.      set COtotal-emission energy-total * COemission-factor
27.      set NOXtotal-emission energy-total * NOXemission-factor
28.      set modern-system 1
29.      set wtp wtp * 0.9]
30.
31. ;;; limit 2 - Domaćinstvo od 50 do 100m2
32.   if modern-system = 0 and urban-rural = 1 and unwilling-to-change = 0
33.     and house-size = 2 and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-2) * wtp < ((wood-
34.       price * energy-kwh/y / 0.55) + wood-s-2)
35.     and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-2) * wtp < ((el-price-l * energy
36.       kwh/y / 1) + el-s-2)
37.     and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-2) * wtp < ((gas-price * energy-
38.       kwh/y / 0.9) + gas-s-2 + gas-connection)
39.     and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-2) * wtp < ((coal-price * energy-
40.       kwh/y / 0.55) + coal-s-2)
41.     and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-2) * wtp < ((pellet-price * energy-
42.       kwh/y / 0.8) + pellet-s-2) * wtp
43.     [set heat-system 6
44.       set color 15
45.       set system-age 0
46.       set system-type 62
47.       set system-effic 3
48.       set CO2emission-factor electricity-co2
49.       set COemission-factor 0
50.       set NOXemission-factor 0
51.       set energy-total energy-kwh/y / system-effic
52.       set CO2total-emission energy-total * CO2emission-factor
53.       set COtotal-emission energy-total * COemission-factor
54.       set NOXtotal-emission energy-total * NOXemission-factor
55.       set modern-system 1
56.       set wtp wtp * 0.9]
57.
58. ;;; limit 3 - Domaćinstvo preko 100m2
59.   if modern-system = 0 and urban-rural = 1 and unwilling-to-change = 0
60.     and house-size = 3 and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-3) * wtp < ((wood-
61.       price * energy-kwh/y / 0.55) + wood-s-3)
62.     and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-3) * wtp < ((el-price-h * energy-
63.       kwh/y / 1) + el-s-3)
64.     and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-3) * wtp < ((gas-price * energy-
65.       kwh/y / 0.9) + gas-s-3 + gas-connection)

```

```
50.    and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-3) * wtp < ((coal-price * energy-
kwh/y / 0.55) + coal-s-3)
51.    and ((el-price-h * energy-kwh/y / 3) + hp-s-3) * wtp < ((pellet-price * energy-
kwh/y / 0.8) + pellet-s-3) * wtp
52.    [set heat-system 6
53.      set color 15
54.      set system-age 0
55.      set system-type 63
56.      set system-effic 3
57.      set CO2emission-factor electricity-co2
58.      set COemission-factor 0
59.      set NOXemission-factor 0
60.      set energy-total energy-kwh/y / system-effic
61.      set CO2total-emission energy-total * CO2emission-factor
62.      set COtotal-emission energy-total * COemission-factor
63.      set NOXtotal-emission energy-total * NOXemission-factor
64.      set modern-system 1
65.      set wtp wtp * 0.9]
```

**Prilog 2 - Kodiranje promene parametra „Spremnost da se plati više“ pod uticajem socijalne mreže**

```
1. ;;; kreiranje veza sa okruženjem
2.   ask households [create-links-to n-of 4 other households]
3.   ask households with [count my-links > 8]
4.     [if count my-links > 8 [ask n-of (count my-links - 8) my-links [die]]]
5.
6. ;;; stavovi okruženja
7.   ask households
8.     [set mean-neighbors mean [wtp] of link-neighbors
9.     set min-neighbors min [wtp] of link-neighbors
10.    set max-neighbors max [wtp] of link-neighbors]
11.
12. ;;; promena volje (WTP) kod domaćinstava da se plati više za održivije sisteme grejanja
    ;;; na osnovu uticaja okoline
13.   to change-wtp
14.     ifelse n-effect = 3 and wtp > min-neighbors
15.       [set wtp wtp - (wtp - (min-neighbors))]
16.       [set wtp wtp]
17.
18.     ifelse n-effect = 2 and wtp > min-neighbors
19.       [set wtp wtp - ((wtp - min-neighbors) / 2)]
20.       [set wtp wtp]
21.
22.     ifelse n-effect = 1 and wtp > min-neighbors
23.       [set wtp wtp - ((mean-neighbors - min-neighbors) / 2)]
24.       [set wtp wtp]
25.
26.     if n-effect = 0
27.       [set wtp wtp]
28.   end
```

## BIOGRAFIJA AUTORA

Boban Pavlović, master inženjer zaštite životne sredine, rođen je 4.7.1990. u Beogradu, gde je završio osnovnu školu „20. oktobar“ i Četvrtu gimnaziju u Beogradu (društveni smer).

Osnovne akademske studije na Univerzitetu u Beogradu na Fakultetu bezbednosti (studije civilne zaštite i zaštite životne sredine) upisao je 2009. godine, a završio 2013. godine sa prosečnom ocenom 8,86 (osam i 86/100). Prve master akademske studije na Univerzitetu u Beogradu na Rudarsko-geološkom fakultetu (studijski programu Inženjerstvo zaštite životne sredine) upisao je 2014. godine, a završio 2016. godine, sa prosečnom ocenom 9,60 (devet i 60/100). Master rad je uradio na temu pod naslovom „Raspoloživost kao dimenzija energetske bezbednosti u Republici Srbiji“. Druge master akademske studije na Univerzitetu u Beogradu na Šumarskom fakultetu (studijski program Ekološki inženjering) upisao je 2014. godine, a završio 2016. godine, sa prosečnom ocenom 9,67 (devet i 67/100). Master rad je uradio na temu pod naslovom „Analiza tematske strategije zemljišta – primer LEAP-a sela Radljevo“.

Nakon master akademskih studija, obavio je stručnu praksu u trajanju od 4 meseca u JKP GSP „Beograd“ u Službi za zaštitu životne sredine. Posao asistenta na projektima u trajanju od 6 meseci obavljao je u preduzeću za konsalting „Envico“ DOO. Posao stručnog saradnika za bezbednost i zdravlje na radu u trajanju od 6 meseci obavljao je u kompaniji „Lidl Srbija“ KD. Položio je stručne ispite iz bezbednosti i zdravlja na radu i zaštite od požara izdate od strane nadležnih ministarstava.

Doktorske akademske studije na Univerzitetu u Beogradu na Rudarsko-geološkom fakultetu (studijski program Rudarsko inženjerstvo) upisao je 2018. godine. Položio je sve ispite sa prosečnom ocenom 10,00 (deset, 00/100). Marta 2019. godine izabran je u zvanje istraživač-pripravnik, a maja 2021. godine izabran je u zvanje istraživač-saradnik.

Kao autor ili koautor publikovao je šest naučnih radova u časopisima sa SCI liste, tri rada u domaćim naučnim časopisima i pet radova na međunarodnim konferencijama. Učestvovao je u izradi nekoliko projekata i studija na Rudarsko-geološkom fakultetu.

Dva puta je dobitnik nagrade Zadužbine Đoke Vlajkovića za najbolji naučni rad mladih naučnih radnika Univerziteta u Beogradu.

# Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Бобан Павловић

Број индекса P713/18

## Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

### **Моделирање и симулација енергетске транзиције у сектору домаћинства**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

# Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Бобан Павловић

Број индекса P713/18

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Моделирање и симулација енергетске транзиције у сектору домаћинства

Ментор др Дејан Ивезић, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### **Моделирање и симулација енергетске транзиције у сектору домаћинства**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_