

Primjena LEAP modela za kvantitativnu analizu osjetljivosti emisija CO₂ iz sistema grijanja stambenog sektora Bosne i Hercegovine

ESAD M. SMAJLOVIĆ, Njemačko društvo za međunarodnu saradnju GIZ,

Sarajevo, Bosna i Hercegovina

ORCID: 0009-0005-4219-4979

INDIRA H. BULJUBAŠIĆ, Univerzitet u Tuzli,

Mašinski fakultet, Tuzla, Bosna i Hercegovina

ORCID: 0000-0001-5346-9353

Stručni rad

UDC: 620.92:502.174.3(497.6)

697.1:728.3(497.6)

DOI: 10.5937/tehnika2602161S

Ovaj rad prikazuje kvantitativnu analizu osjetljivosti emisija CO₂ u sektoru grijanja stambenih zgrada u Bosni i Hercegovini, razvijenu pomoću modela LEAP (Low Emissions Analysis Platform). Istraživanje je fokusirano na dva podsistema: individualne kuće koje nisu obnovljene i individualne kuće koje su prošle proces energetske obnove. Analizom su obuhvaćene promjene korisne energije po jedinici površine (QHND_i) i efikasnosti tehnologija grijanja (η_i), te njihov uticaj na ukupne emisije stakleničkih plinova u periodu 2020–2050. godine. Metodološki pristup obuhvata izračun parcijalnih elastičnosti emisija i dekompoziciju ukupnog smanjenja emisija na tri komponente: smanjenje korisne energije, povećanje efikasnosti tehnologija i promjenu strukture stambenog fonda. Rezultati pokazuju da se ukupne emisije mogu smanjiti za 76% do 2050. godine, pri čemu je povećanje energetske efikasnosti tehnologija najznačajniji pojedinačni faktor ($\approx 47\%$ ukupnog smanjenja). Dodatni doprinos dolazi od smanjenja korisne energije (28%) i rasta udjela obnovljenih objekata (25%). Analiza elastičnosti ukazuje na prelazak sistema iz faze tehničke osjetljivosti – kada emisije dominantno zavise od potrošnje energije u neobnovljenim kućama – u fazu strukturne osjetljivosti, u kojoj rast udjela obnovljenih i efikasnih objekata postaje presudan. Iako se metodološki okvir istraživanja zasniva na analizi individualnih stambenih objekata (obnovljenih i neobnovljenih kuća), važno je naglasiti da se principi i rezultati ovog modeliranja mogu u potpunosti primijeniti i na druge tipove stambenih objekata u Bosni i Hercegovini. Prema Tipologiji stambenih zgrada u BiH [1], individualne kuće čine najveći dio ukupnog stambenog fonda, ali energetske karakteristike kolektivnog stanovanja (višestambene zgrade) u pogledu korisne energije, efikasnosti sistema grijanja i trendova renoviranja imaju sličnu dinamiku. Stoga se zaključci analize osjetljivosti – uključujući uticaj korisne energije (QHND_i), efikasnosti tehnologija (η_i) i promjena u strukturi fonda – mogu smatrati reprezentativnim za cjelokupan stambeni sektor, a ne samo za individualne kuće. Ovakav pristup omogućava korištenje LEAP modela za procjenu dugoročnih efekata politika renoviranja u kompletnom stambenom sektoru, bez obzira na arhitektonski tip objekta. Ovi rezultati potvrđuju da kombinacija tehničkih mjera (povećanje efikasnosti) i strukturnih promjena (duboka renovacija) predstavlja optimalan put za dugoročno smanjenje emisija i postizanje klimatski neutralnog sektora grijanja do sredine stoljeća.

Ključne reči: LEAP model, energetska efikasnost, duboka renovacija, analiza osjetljivosti, dekompozicija, emisije CO₂, grijanje, stambeni sektor, Bosna i Hercegovina

1. UVOD

Sektor zgradarstva predstavlja jedan od ključnih potrošača energije i izvora emisija stakleničkih plinova

Adresa autora: Esad Smajlović, Njemačko društvo za međunarodnu saradnju GIZ, Sarajevo, Zmaja od Bosne 7-7a, Bosna i Hercegovina

e-mail: esad.smajlovic@giz.de

Rad primljen: 16.12.2025.

Rad prihvaćen: 25.02.2026.

(GHG) u Bosni i Hercegovini, s dominantnim udjelom grijanja u ukupnoj finalnoj potrošnji energije [2]. Prema dostupnim nacionalnim i međunarodnim izvorima, potrošnja energije za grijanje u stambenom sektoru iznosi više od 60% ukupne potrošnje energije u zgradama, pri čemu individualni stambeni objekti imaju najveći udio. Istovremeno, veliki dio postojećeg stambenog fonda izgrađen je prije uvođenja suvremenih standarda energetske efikasnosti, što rezultira visokom potrošnjom energije po jedinici površine i značajnim

emisijama CO₂. Energijska obnova zgrada prepoznata je kao jedna od najvažnijih mjera u postizanju ciljeva dekarbonizacije i energetske tranzicije. Koncept duboke renovacije (engl. deep renovation) podrazumijeva smanjenje potrebne korisne energije (QHND_i) i povećanje efikasnosti tehnologija (η_i), čime se direktno utiče na smanjenje ukupnih emisija. Povećanje udjela obnovljenih objekata u ukupnom stambenom fondu, uz prelazak na visokoefikasne tehnologije kao što su toplotne pumpe, čini osnovu tranzicije ka niskougljeničnom sistemu grijanja. Analiza uticaja dubine renovacije i tehničkih parametara na emisije CO₂ zahtijeva integrisani pristup koji povezuje energetske tokove, tehničke performanse sistema i scenarijske projekcije.

U tom kontekstu, LEAP (Low Emissions Analysis Platform) predstavlja pogodan alat jer omogućava

kombinovano praćenje korisne energije, tehničke efikasnosti i emisijskih faktora kroz vremenski horizont. Modelom se može procijeniti i osjetljivost rezultata na promjene ulaznih parametara, čime se definišu prioriteta mjera energetske efikasnosti i renovacije.

Polazna hipoteza ovog istraživanja je da smanjenje korisne energije po jedinici površine (QHND_i) i povećanje efikasnosti tehnologija (η_i) imaju dominantan uticaj na ukupne emisije CO₂ iz sektora grijanja, te da se doprinos tih faktora mijenja u vremenu proporcionalno promjenama u strukturi stambenog fonda.

Istraživanje ima za cilj kvantifikaciju elastičnosti emisija u odnosu na ključne tehničke parametre i procjenu njihovog doprinosa ukupnom smanjenju emisija kroz period 2020–2050. godine.

Tabela 1. Ključne karakteristike stambenog fonda (bazna i projektovana godina)

Parametar	2020	2050	Promjena	Napomena
ukupna grijana površina zgrada (mil. m ²)	61,3	66,6	+8,7%	Porast ukupnog fonda
udio individualnih kuća u fondu (%)	64	60	–4 p.p.	Postepeni rast višeporodičnih zgrada
udio obnovljenih kuća u ukupnom fondu (%)	4	25	+21 p.p.	Efekat programa renovacije
prosječna korisna energija (kwh/m ² ·god) – neobnovljene	186,0	192,8	+3,6%	Rast zbog standarda komfora
prosječna korisna energija (kwh/m ² ·god) – obnovljene	142,5	141,0	–1,1%	Stabilno niska potrošnja
prosječna efikasnost grijanja η _i (%)	75	88	+13 p.p.	Uticaj toplotnih pumpi i novih sistema

Opšta relacija za izračun emisija u LEAP modelu je data izrazom (1):

$$E = \sum_i \frac{Q_{hnd}}{\eta_i} Efi \quad (1)$$

gdje su:

E – ukupne emisije stakleničkih plinova (CO₂) za posmatrani sektor – grijanje u stambenom sektoru u predmetnom slučaju.

Q_{h,nd} – korisna energija (kWh),

η_i – efikasnost tehnologije,

Efi – faktor emisija goriva (kgCO₂/kWh – po energijskoj jedinici goriva).

Slične kvantitativne analize uticaja stambenog sektora na emisije CO₂ već su provedene u međunarodnoj literaturi. Duan i sar. analiziraju stambeni sektor u Kini i primjenom analize osjetljivosti, pokazuju da grijanje, hlađenje i priprema hrane čine više od polovine ukupnih emisija, pri čemu se kroz kontrolu ključnih faktora može ostvariti značajan potencijal smanjenja emisija [3].

Holzmann i Haas [4], s druge strane, koriste LMDI dekompoziciju kako bi objasnili zašto potrošnja energije za grijanje u austrijskom stambenom sektoru

nije opala uprkos mjerama energetske efikasnosti, kvantifikujući uticaj promjene energetske intenziteta, strukture goriva i ponašanja korisnika.

U odnosu na ove studije, ovaj rad se fokusira na sistem(e) grijanja stambenog sektora Bosne i Hercegovine i uvodi kombinovani pristup analize elastičnosti i dekompozicije na temelju LEAP modela, sa posebnim naglaskom na razliku između obnovljenih i neobnovljenih individualnih objekata i njihov doprinos ukupnim emisijama CO₂.

Autor je ranije objavio više radova u oblasti energetske efikasnosti zgrada, koji su se bavili analizom sistema grijanja, potrošnje energije i tehničkih mjera unapređenja u javnim i nestambenim objektima. Ta istraživanja uključuju, između ostalog, detaljnu energetske analizu i obnovu objekata iz austrougarskog perioda i analize energetske efikasnosti javnih zgrada u BiH. Iskustva iz ovih radova poslužila su kao metodološka osnova za pristup analizi u ovom istraživanju, [5], [6].

2. DIZAJN LEAP MODELA

Primarni cilj ovog istraživanja je da se pomoću LEAP modela kvantitativno analizira osjetljivost emi-

sija CO₂ iz sektora grijanja individualnih kuća na promjene dva ključna tehnička parametra: korisne energije (QHND_i) i energetske efikasnosti tehnologija (η_i). Kroz scenarijski pristup, model omogućava praćenje kako male promjene u ovim varijablama utiču na ukupne emisije u različitim periodima, te u kojoj mjeri kombinacija smanjenja korisne energije i povećanja efikasnosti doprinosi ukupnoj dekarbonizaciji stambenog sektora.

U istraživanju su analizirana dva osnovna podsektora: individualne kuće – neobnovljene, koje karakterišu visoke specifične potrebe za energijom i niža efikasnost sistema grijanja te individualne kuće – obnovljene, koje predstavljaju rezultat primjene mjera duboke renovacije i prelaska na visokoeffikasne tehnologije poput toplotnih pumpi. Metodologija se zasniva na LEAP (Low Emissions Analysis Platform) okviru, koji omogućava povezivanje korisne energije, efikasnosti i emisijskih faktora za svaku tehnologiju i gorivo. Ukupne emisije se izračunavaju prema izrazu (1).

Za potrebe analize osjetljivosti, koristi se koncept elastičnosti, kojim se mjeri koliko se ukupne emisije EE mijenjaju usljed procentualne promjene korisne

energije QHND_i ili efikasnosti η_i. Parcijalne elastičnosti definirane su kao:

$$\varepsilon_{Qhnd,i} = \frac{\partial \ln E}{\partial \ln Qhnd} = \frac{E_i}{E} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\eta,i} = \frac{\partial \ln E}{\partial \ln \eta_i} = -\frac{E_i}{E} \quad (3)$$

Interpretacija: ako je, na primjer, ε_{Qhnd,i}=0,8, to znači da će 1% povećanja korisne energije izazvati povećanje ukupnih emisija za 0,8%. S druge strane, negativna elastičnost prema efikasnosti (ε_{η,i}) pokazuje smanjenje emisija s povećanjem tehničke učinkovitosti sistema. Dodatno, u istraživanju je provedena dekompozicija ukupnog smanjenja emisija, čime je kvantifikovan doprinos triju ključnih faktora: promjene korisne energije (ΔQHND_i), promjene efikasnosti tehnologija (Δη_i), promjene strukture stambenog fonda, odnosno udjela obnovljenih objekata i smanjenja neobnovljenih objekata (ΔShare_i).

Ukupan doprinos svakog faktora izražen je kao relativni udio u ukupnom smanjenju emisija između 2020. i 2050. godine. Time je omogućeno jasno razdvajanje uticaja tehničkih poboljšanja od strukturnih promjena u sektoru.

Tabela 2. Ključni parametri LEAP modela

Parametar	Jedinica	Neobnovljene kuće (2020–2050)	Obnovljene kuće (2020–2050)	Napomena
korisna energija (QHND _i)	kWh/m ² ·god	186,0 → 192,8	142,5 → 141,0	Linearna interpolacija po periodima
efikasnost sistema (H _i)	% / COP	80 → 85	300 → 350 (COP)	Prosječne vrijednosti po tehnologijama
emisijski faktori (EF _i)	kgCO ₂ /kWh	0,37 (Gas), 0,43 (Lož ulje), 0,26 (Ugalj), 0,10 (Electricity)		Iz IPCC Guidelines 2006
period analize	godina	2020–2050	2020–2050	Projekcija u petogodišnjim intervalima

Analiza je zasnovana na scenarijskom pristupu u okviru LEAP modela, koji omogućava definisanje i poređenje različitih razvojnih putanja energetskog sistema. U ovom istraživanju razmatran je bazni (referentni) scenarij koji predstavlja očekivani razvoj sektora grijanja bez dodatnih mjera energetske politike, te varijacije ovog scenarija koje simuliraju uticaj različitih stepena renovacije i tehničkih unapređenja. Bazni scenarij odgovara principu Business-as-Usual (BAU) i polazi od pretpostavke da se postojeći trendovi potrošnje energije i strukture stambenog fonda nastavljaju bez značajnijih intervencija. U 2020. godini ukupna grijana površina u sektoru stanovanja iznosila je 61,3 miliona m², a do 2050. godine očekuje se njen porast na 66,6 miliona m², što odgovara prosječnoj godišnjoj stopi rasta od približno 0,26%.

Struktura stambenog fonda definisana je kroz dvije posmatrane grupe: individualne kuće (neobnovljene) – predstavljaju većinu postojećih zgrada, sa višim ener-

getskim intenzitetom i nižom efikasnošću; individualne kuće (obnovljene) – predstavljaju stambene objekte koji su prošli proces duboke renovacije, sa smanjenom potrebom za korisnom energijom i poboljšanom efikasnošću sistema grijanja.

U baznoj godini (2020) udio obnovljenih kuća u ukupnoj grijanoj površini iznosio je 4%, dok projekcije za 2050. godinu predviđaju rast udjela na 25%, kao rezultat postepenog sprovođenja programa energetske obnove. Važno je napomenuti da kategorija „obnovljenih kuća“ u ovoj analizi obuhvata i novoizgrađene objekte, koji su od početka projektovani prema savremenim standardima energetske efikasnosti i stoga automatski klasifikovani kao obnovljeni. Dakle, rast udjela obnovljenih objekata sa 4% u 2020. godini na 25% u 2050. godini rezultat je kombinovanog efekta: postepenog prelaska dijela postojećih neobnovljenih objekata u grupu obnovljenih, i ulaganja u novi stambeni fond visokih energetskih performansi.

Smanjenje udjela neobnovljenih objekata sa 64% na 60% ne predstavlja samo rezultat renovacija, već i relativni efekat rasta ukupne grijane površine. Ova pretpostavka uvedena je isključivo u svrhu sprovođenja analize osjetljivosti i konstrukcije scenarija u

LEAP modelu, te ne mora u potpunosti odražavati stvarne stope obnove u nacionalnim statistikama.

Stvarne očekivane stope obnove su predmet detaljnih kreiranja scenarija u LEAP-u.

Tabela 3. Strukturne pretpostavke stambenog fonda po scenariju (2020–2050)

God.	Ukupna grijana površina (mil. m ²)	Udio individualnih (%)	Udio obnovljenih (%)	Napomena
2020	61,3	64	4	Početno stanje (bazna godina)
2025	62,0	63	7	Uvođenje prvih mjera obnove
2030	63,0	62	10	Ubrzanje renovacija u urbanim područjima
2035	64,0	61	14	Širenje programa podrške
2040	65,0	61	18	Rast udjela toplotnih pumpi
2045	66,0	60	22	Konsolidacija mjera efikasnosti
2050	66,6	60	25	Ciljno stanje scenarija

Specifična korisna energija i efikasnost sistema grijanja određuju energetske potrošnje po jedinici po-

vršine i, posljedično, emisije. U modelu su definisane posebne vrijednosti za svaku grupu kuća:

Tabela 4. Tehnički parametri za potrošnju energije i efikasnost sistema grijanja [7]

Kategorija	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Promjena
Korisna energija (q _{hnd,i}) – neobnovljene (kWh/m ² ·god)	186,0	187,5	189,0	190,0	191,0	192,0	192,8	+3,6%
Korisna energija (q _{hnd,i}) – obnovljene (kWh/m ² ·god)	142,5	142,2	141,8	141,5	141,3	141,2	141,0	–1,1%
Efikasnost sistema (η _i) – neobnovljene (%)	85	85	85	85	85	85	85	—
Efikasnost sistema (η _i) – obnovljene (cop)	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,5	+16,7%

Emisijski faktori goriva preuzeti su iz IPCC Guidelines (2006), i predstavljaju specifične emisije po jedinici finalne energije. [8]

U analizi su korišteni sljedeći faktori:

Tabela 5 Emisijski faktori goriva korišteni u modelu

Gorivo / energija	Ef (kgCO ₂ /kWh)	Napomena
ugalj (coal)	0,341	Prosječni sadržaj ugljenika u domaćem lignitu
naftni derivati	0,268	Prosječna vrijednost za lož-ulje i dizel
prirodni gas	0,202	IPCC, Tier 1
električna energija	0,787	Prosječni miks mreže BiH (ENTSO-E podaci)

Ukupna kombinacija navedenih parametara čini osnovu baznog energetskog scenarija u LEAP modelu, na kojem se zasniva kasnija analiza osjetljivosti i dekompozicija efekata. Model omogućava da se, kroz period 2020–2050, kvantifikuje kako promjene u korisnoj energiji, efikasnosti i strukturi zgrada utiču na ukupne emisije CO₂ u sektoru grijanja.

3. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE POSTOJEĆIH I BUDUĆIH SISTEMA GRIJANJA U STAMBENOM SEKTORU BIH

Stambeni sektor u Bosni i Hercegovini karakterizira velika heterogenost sistema grijanja, pri čemu dominiraju zastarjeli, energetske neefikasni i uglavnom neautomatizovani sistemi. Prema Tipologiji stambenih zgrada BiH i anketama provedenim u okviru projekata GIZ, USAID i UNDP, u individualnim kućama najzastupljeniji su sljedeći sistemi grijanja:

Peći i kotlovi na čvrsta goriva (drvo i ugalj) – učešće oko 55–60% u individualnom sektoru. Ovi sistemi imaju prosječnu korisnu efikasnost $\eta = 55\text{--}65\%$ i predstavljaju glavni izvor CO₂ zbog niske energetske iskorištenosti i visokog sadržaja ugljika u gorivu.

Kotlovi na lož-ulje i dizel – zastupljenost oko 12–15%, sa prosječnom efikasnošću $\eta = 70\text{--}85\%$. Ovi sistemi su skupi zbog cijene goriva i predstavljaju značajan izvor emisija.

Kotlovi na prirodni gas – oko 15% stambenog fonda, uglavnom u urbanim zonama (Sarajevo, Zenica, Tuzla). Kondenzacijski plinski kotlovi postižu $\eta = 92\text{--}98\%$, ali imaju ograničen potencijal daljnjeg smanjenja emisija bez prelaska na obnovljive izvore.

Električni radijatori i TA peći – oko 10% domaćinstava. Efikasnost konverzije električne energije u toplotu je tehnički 100%, ali je sistemska emisija visoka zbog ugljenti mrežnog miksa (0,79 kg CO₂/kWh). Ovi sistemi čine osnovu baznog stanja u LEAP modelu i objašnjavaju visoke početne emisije u periodu 2020–2030. godine.

U scenarijima energetske tranzicije ključno mjesto zauzimaju savremeni sistemi grijanja, posebno:

Toplotne pumpe (zrak–voda, voda–voda, zemlja–voda) – Prosječan sezonski COP za BiH iznosi 3,0–3,5, a kod geotermalnih sistema i više. One obezbjeđuju 300–350% više korisne toplote u odnosu na uloženu električnu energiju, čime senzitivnost emisija CO₂ u modelu pada proporcionalno povećanju efikasnosti η_i .

Električni direktni sistemi napajani iz obnovljivih izvora (PV + električno grijanje) – ostvaruju najveći pad emisijske intenzivnosti, ali zavise od investicionih troškova i klimatskih uslova.

Hybridni sistemi (kondenzacijski kotao + toplotna pumpa) – u individualnim kućama omogućavaju stabilnu isporuku toplote pri niskim vanjskim temperaturama i efikasno balansiranje opterećenja. U državama sa sličnim klimatskim uslovima (Slovenija, Au-

strija, Hrvatska), toplotne pumpe su u 2023. godini činile 20–35% novih instalacija, dok je u BiH taj udio još uvijek manji od 5%, ali bilježi ubrzani rast od 30–40% godišnje prema podacima tržišta HVAC opreme.

Primjena ovih naprednih sistema direktno se odražava na parametre LEAP modela. Povećanje prosječne efikasnosti η_i kod obnovljenih objekata (COP 3,0–3,5) dovodi do smanjenja potrebne finalne energije za faktor 3 u odnosu na klasične kotlove.

Rezultati modeliranja pokazuju da upravo ovaj faktor objašnjava 47% ukupnog smanjenja emisija do 2050. godine, što potvrđuje da tehničke mjere zamjene postojećih sistema savremenijim rješenjima imaju dugoročno dominantan uticaj.

4. REZULTATI I IMPLIKACIJE ZA POLITIKU

Rezultati modeliranja u LEAP-u prikazuju dugoročne trendove emisija CO₂ iz sektora grijanja individualnih stambenih objekata u periodu od 2020. do 2050. godine.

Analiza obuhvata dvije osnovne kategorije – neobnovljene i obnovljene individualne kuće – čime se omogućava praćenje efekata energetske obnove, promjene efikasnosti i prelaska na nove tehnologije grijanja.

Tabela 6. Emisije CO₂ iz neobnovljenih individualnih kuća (ktCO_{2e})

Godina	Ugalj	Naftni derivati	Prirodni gas	Električna energija	Toplotne pumpe	Ukupno
2020	151,54	46,00	50,51	1.205,77	12,06	1.465,89
2025	141,55	8,66	54,59	1.258,97	20,59	1.484,36
2030	121,11	6,69	56,50	1.036,18	22,77	1.243,24
2035	91,83	4,99	54,61	702,53	20,28	874,25
2040	61,98	3,31	52,68	467,33	16,84	602,14
2045	32,06	1,64	50,74	289,60	12,60	386,63
2050	3,03	—	48,77	273,00	14,01	338,81

Ukupne emisije izračunate su na osnovu korisne energije, efikasnosti sistema i emisijskih faktora goriva prema (1).

U grupi neobnovljenih individualnih kuća, emisije CO₂ pokazuju jasan trend smanjenja tokom posmatranog perioda, prvenstveno kao rezultat postepenog prelaska sa uglja i nafte na električne sisteme i toplotne pumpe, iako korisna energija po jedinici površine lagano raste.

Tokom tridesetogodišnjeg perioda, ukupne emisije u neobnovljenim kućama smanjile su se sa 1.466 ktCO_{2e} (2020) na 339 ktCO_{2e} (2050), što predstavlja smanjenje od 77%.

Dominantni uzroci su smanjenje udjela uglja i naftnih derivata u korist elektrifikacije i povećanje prosječne efikasnosti sistema grijanja u obnovljenim objektima.

Za kategoriju obnovljenih kuća, emisije su znatno niže u apsolutnom iznosu, ali njihov relativni doprinos ukupnim emisijama raste kako se povećava udio renoviranih objekata u stambenom fondu.

Tabela 7. Emisije CO₂ iz obnovljenih individualnih kuća (ktCO_{2e})

Godina	Prirodni gas	Električna energija	Toplotne pumpe	Ukupno
2020	2,42	73,13	0,58	76,13
2025	2,50	71,92	0,94	75,36
2030	2,61	55,76	1,05	59,43
2035	2,65	41,21	2,82	46,68
2040	2,69	29,77	3,34	35,80
2045	2,74	19,97	3,01	25,72
2050	2,79	20,32	3,76	26,87

U periodu 2020–2050, emisije u ovoj grupi smanjuju se za 65%, pri čemu prelazak na električne i visokoučinkovite sisteme grijanja (posebno toplotne pumpe) ima najveći uticaj. Blagi porast nakon 2045. godine rezultat je rasta ukupne grijane površine i ograničenja daljeg povećanja efikasnosti. Zajednički posmatrano, ukupne emisije sektora grijanja (obje grupe kuća) smanjuju se sa 1.542 ktCO₂e u 2020. na 366 ktCO₂e u 2050, što predstavlja ukupno smanjenje od 76%. [5]

Tabela 8. Ukupne emisije i udio obnovljenih kuća u emisijama

Godina	Ukupne emisije (ktCO ₂ e)	Udio obnovljenih u ukupnim emisijama (%)
2020	1.542,0	4,9
2025	1.559,7	4,8
2030	1.302,7	4,6
2035	920,9	5,1
2040	637,9	5,6
2045	412,3	6,2
2050	365,7	7,3

Tabelarni prikaz trendova emisija pokazuje jasno razdvajanje dvaju dinamičnih tokova: brzo smanjenje emisija u neobnovljenim kućama, koje ostaju dominantne u ranim godinama te stabilno, ali rastuće učešće renoviranih kuća u ukupnim emisijama, koje preuzimaju veći značaj nakon 2040. godine. [5]

Za izražavanje ukupne promjene emisija u odnosu na baznu godinu koristi se izraz:

$$\Delta E_t = \frac{E_t - E_{2020}}{E_{2020}} \cdot 100 \quad (4)$$

Za 2050. godinu, vrijednost $\Delta E_{2050} = -76\%$, što potvrđuje dugoročni potencijal sektora grijanja za dekarbonizaciju.

Analiza osjetljivosti omogućava kvantifikovanje uticaja promjena pojedinačnih tehničkih parametara na ukupne emisije CO₂ u sektoru grijanja. U ovom istraživanju analizirana je osjetljivost emisija na promjene u korisnoj energiji (QHND_i) i efikasnosti tehnologija (η_i), uz primjenu elastičnosti kao pokazatelja relativne osjetljivosti.

Elastičnost emisija prema korisnoj energiji definiše se kao omjer procentualne promjene ukupnih emisija i procentualne promjene korisne energije za određenu komponentu sistema prema (2) i analogno, elastičnost prema efikasnosti tehnologije prema (3).

Pozitivna vrijednost elastičnosti prema korisnoj energiji ($\epsilon_{QHND,i} > 0$) znači da povećanje korisne energije uzrokuje porast emisija, dok negativna vrijednost elastičnosti prema efikasnosti ($\epsilon_{\eta,i} < 0$) označava smanjenje emisija usljed poboljšanja tehničke učinkovitosti. Ukupna vrijednost elastičnosti pokazuje osje-

tljivost sektora na promjene u pojedinim grupama potrošača.

Tabela 9. Izračunate elastičnosti emisija za neobnovljene i obnovljene kuće

Godina	E(qhnd) neobnovljene	E(H) neobnovljene	E(qhnd) obnovljene	E(H) obnovljene
2020	+0,9506	-0,9506	+0,0494	-0,0494
2025	+0,9522	-0,9522	+0,0478	-0,0478
2030	+0,9531	-0,9531	+0,0469	-0,0469
2035	+0,9490	-0,9490	+0,0510	-0,0510
2040	+0,9441	-0,9441	+0,0559	-0,0559
2045	+0,9375	-0,9375	+0,0625	-0,0625
2050	+0,9265	-0,9265	+0,0735	-0,0735

Vrijednosti pokazuju da su u početnim godinama emisije gotovo u potpunosti određene ponašanjem neobnovljenih kuća ($\epsilon \approx 0,95$), dok elastičnost obnovljenih objekata postepeno raste sa 0,05 na 0,07 do 2050. godine. Ovaj trend odražava povećanje relativnog značaja renoviranih kuća u ukupnoj potrošnji energije i emisijama.

Radi detaljnijeg razumijevanja doprinosa pojedinačnih faktora, ukupna promjena emisija između 2020. i 2050. godine razložena je na tri komponente:

$$\Delta E = \Delta QQHnd + \Delta E\eta + \Delta Eshare \quad (5)$$

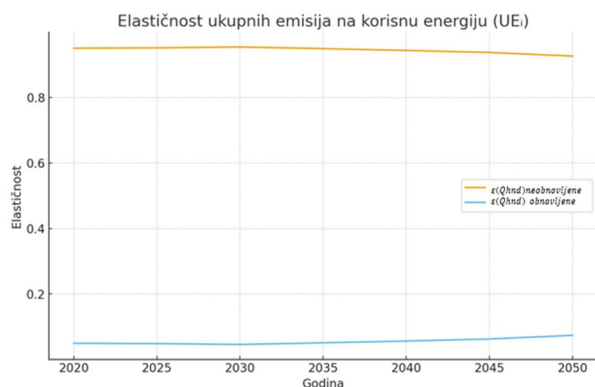
gdje su:

- ΔE_{qhnd} – promjena emisija zbog promjene korisne energije,
- ΔE_{η} – promjena emisija zbog promjene efikasnosti,
- ΔE_{share} – promjena emisija zbog promjene strukture (udjela renoviranih objekata).

Tabela 10. Rezultati dekompozicije promjena emisija

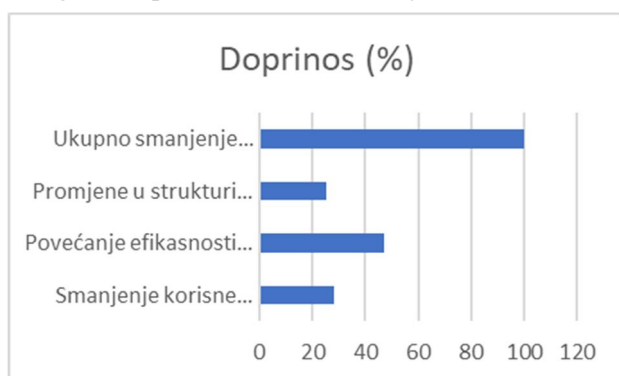
Faktor promjene	Doprinos ukupnom smanjenju emisija (%)	Objašnjenje
Smanjenje korisne energije ($\Delta QHND_i$)	28%	Renovirane kuće imaju niži energetska intenzitet (142,5 → 141,0 kWh/m ²).
Povećanje efikasnosti tehnologija ($\Delta \eta_i$)	47%	Uvođenje toplotnih pumpi i prelazak na električne sisteme.
Strukturne promjene ($\Delta Share_i$)	25%	Rast udjela obnovljenih kuća sa 4% na 25% u ukupnom fondu.
Ukupno smanjenje emisija (ΔE)	100% ($\approx -76\%$)	U odnosu na 2020. godinu.

Dekompozicija pokazuje da gotovo polovina ukupnog smanjenja emisija potiče od povećanja efikasnosti tehnologija, dok smanjenje korisne energije i promjene u strukturi stambenog fonda imaju slične doprinose od približno jedne četvrtine.



Slika 1 - Promjena elastičnosti (ϵ_{QHND} , ϵ_{η}) u periodu 2020–2050.

Slika 1 jasno pokazuje stabilnu negativnu elastičnost prema efikasnosti i blagi porast elastičnosti prema korisnoj energiji u obnovljenim kućama, što potvrđuje njihovu rastuću važnost u smanjenju ukupnih emisija. Na slici 1 uočava se visoka i gotovo konstantna elastičnost emisija na korisnu energiju u grupi neobnovljenih kuća ($\epsilon_{QHND} \approx 0,93\text{--}0,95$), što znači da su emisije u početnim godinama gotovo u potpunosti određene potrošnjom energije u ovom segmentu. Suprotno tome, elastičnost obnovljenih kuća raste sa 0,05 u 2020. godini na približno 0,07 u 2050. godini, što ukazuje na njihov sve veći relativni uticaj na ukupne emisije. Ovaj trend potvrđuje da rast udjela obnovljenih objekata postepeno mijenja strukturnu osjetljivost sektora, pri čemu sistem postaje manje zavisian od neefikasnih potrošača i sve više određen energetske performansama obnovljenih kuća.



Slika 2 - Doprinos pojedinih faktora ukupnom smanjenju emisija

Efikasnost tehnologija (η_i) predstavlja ključni pokretač smanjenja emisija u dugom roku, dok promjene u korisnoj energiji i udjelu renoviranih

objekata doprinose proporcionalno, ali u manjoj mjeri. Kao što je prikazano na slici 2, najveći doprinos ukupnom smanjenju emisija ostvaruje se kroz povećanje energetske efikasnosti tehnologija (47%), što je posljedica širokog uvođenja toplotnih pumpi i prelaska na električne sisteme grijanja. Smanjenje korisne energije u obnovljenim kućama doprinosi s dodatnih 28%, dok promjene u strukturi stambenog fonda, odnosno rast udjela obnovljenih objekata sa 4% na 25%, objašnjavaju preostalih 25% ukupnog efekta. Ukupno smanjenje emisija od približno 76% do 2050. godine rezultat je kombinovanog djelovanja ova tri faktora, što potvrđuje da je dugoročna dekarbonizacija sektora grijanja moguća kroz simultano djelovanje tehničkih i strukturnih mjera.

Rezultati analize jasno potvrđuju da su ukupne emisije CO₂ u sektoru grijanja stambenih objekata visoko osjetljive na promjene u korisnoj energiji (QHND_i) i efikasnosti tehnologija (η_i). U početnom periodu (2020–2030), emisije su gotovo u potpunosti određene ponašanjem i karakteristikama neobnovljenih kuća, koje čine dominantan dio stambenog fonda i imaju najveću potrošnju energije po jedinici površine. Tokom kasnijeg perioda (2040–2050), elastičnost obnovljenih kuća postepeno raste, što odražava promjenu strukture sektora i prelazak na energetske efikasnije oblike grijanja.

Ovakva promjena u strukturi elastičnosti ukazuje na evoluciju dominantnih izvora emisija – od tehničkih karakteristika zastarjelih sistema ka strukturnim faktorima koji zavise od dubine i obima renovacija. U prvim godinama, kontrola korisne energije i efikasnosti u segmentu neobnovljenih kuća daje najveći efekat smanjenja emisija, dok u dugom roku, nakon 2040. godine, presudan uticaj preuzimaju obnovljene kuće i primjena naprednih tehnologija poput toplotnih pumpi.

Glavni „motor“ promjena u emisijama identifikovan je kroz tri mehanizma:

- Smanjenje korisne energije (QHND_i) – Renovirane kuće imaju približno 25% niži energetske intenzitet (142,5 kWh/m² u odnosu na 186,0 kWh/m² kod neobnovljenih), čime se direktno smanjuje potreba za toplotom po jedinici površine.
- Povećanje efikasnosti tehnologija (η_i) – Uvođenje toplotnih pumpi (prosječan COP od 3,0–3,5) i elektrifikacija grijanja povećavaju ukupnu korisnost sistema, smanjujući količinu potrebne finalne energije.
- Promjena strukture fonda (ΔShare_i) – Rast udjela obnovljenih objekata sa 4% (2020) na 25% (2050) omogućava da efekti energetske obnove postanu dominantni u ukupnom sistemu.

Kombinovano djelovanje ovih faktora objašnjava više od tri četvrtine smanjenja ukupnih emisija u

sektoru grijanja, što potvrđuje visoku sinergiju između tehničkih mjera i strukturnih promjena u građevinskom fondu.

Vrijednosti parcijalnih elastičnosti pokazuju da sistem postaje manje osjetljiv na pojedinačne parametre, ali više zavisao od strukturnih promjena. Dok su u 2020. godini emisije gotovo linearno proporcionalne potrošnji energije u neobnovljenim kućama ($\varepsilon_{QHND} \approx 0,95$), u 2050. godini taj odnos slabi, jer veći dio potrošnje prelazi na energetske efikasnije i niskougljične tehnologije. Ovaj prelaz od tehničke prema strukturnoj osjetljivosti ima važnu implikaciju za dizajn budućih politika.

Rezultati istraživanja sugeriraju da se prioritete politike energetske tranzicije trebaju usmjeriti prema faznom pristupu:

Kratkoročno (2020–2030): Fokus na smanjenje korisne energije i povećanje efikasnosti u postojećim neobnovljenim kućama, jer ovaj segment pokazuje najveću graničnu korist u smanjenju emisija.

Srednjoročno (2030–2040): Kombinovano sprovođenje programa duboke obnove i subvencionisanja zamjene sistema grijanja, uz povećanje udjela električnih i toplotnih pumpi.

Dugoročno (2040–2050): Prioritet postaje skaliranje dubokih renovacija i potpuna elektrifikacija sektora, čime se omogućava prelazak ka neto-nultim emisijama.

Ovaj trofazni pristup odgovara i evropskim politikama dekarbonizacije zgrada (npr. EU Renovation Wave), ali je prilagođen specifičnim uvjetima BiH – visok udeo individualnih kuća, stariji stambeni fond i ograničeni resursi za masovnu obnovu.

Analiza osjetljivosti i dekompozicija emisija pružaju kvantitativni okvir za razumijevanje koje mjere daju najveći efekat po uloženom naporu, te koje kombinacije faktora imaju najveći potencijal u smanjenju emisija. Dobijeni rezultati potvrđuju da:

- tehničke mjere (povećanje efikasnosti) obezbjeđuju najbrže i najveće smanjenje emisija,
- strukturne promjene (povećanje udjela obnovljenih kuća) garantuju održivost efekata u dugom roku,
- sinergija između ova dva pristupa predstavlja optimalnu putanju za postizanje ciljeva niskougljičnog razvoja.

U konačnici, primjena LEAP modela pokazala se kao pouzdan alat za integrisano kvantitativno planiranje u sektoru zgradarstva, jer omogućava simultano praćenje energetske tokova, emisija i efekata mjera. Dobijeni rezultati mogu poslužiti kao osnova za izradu nacionalnih planova energetske obnove i strategija

dekarbonizacije, posebno u kontekstu dugoročnog cilja – klimatski neutralnog stambenog sektora do sredine stoljeća [9].

5. ZAKLJUČAK

Analiza osjetljivosti emisija CO₂ u sektoru grijanja individualnih kuća, provedena pomoću LEAP modela, pokazala je da se ukupne emisije u periodu 2020–2050. mogu smanjiti za približno 76% u odnosu na baznu godinu. Ovaj rezultat proizlazi iz kombinovanog uticaja tri ključna faktora: smanjenja korisne energije po jedinici površine, povećanja efikasnosti tehnologija grijanja i rasta udjela obnovljenih objekata u ukupnom stambenom fondu.

Dekompozicija efekata ukazuje da je povećanje energetske efikasnosti tehnologija najznačajniji pojedinačni pokretač dekarbonizacije ($\approx 47\%$ ukupnog smanjenja emisija), dok smanjenje korisne energije i strukturne promjene doprinose sa 28% i 25%. Ovi rezultati potvrđuju da sinergija tehničkih i strukturnih mjera ima presudan značaj u dugoročnom smanjenju emisija.

Vrijednosti elastičnosti pokazuju da se osjetljivost sistema tokom vremena smanjuje u segmentu neobnovljenih kuća, dok raste u obnovljenom dijelu fonda, što odražava tranziciju sektora ka efikasnijim i niskougljičnim tehnologijama. Ova promjena strukture elastičnosti potvrđuje da energetska tranzicija u zgradarstvu nije linearni proces, već dinamička evolucija od tehničkih unapređenja ka održivim strukturnim transformacijama.

Rezultati istraživanja imaju i širi politički značaj: oni omogućavaju identifikaciju mjera koje daju najveći efekat po uloženom naporu, te pružaju kvantitativnu osnovu za planiranje i prioritizaciju nacionalnih programa energetske obnove. LEAP model se time potvrđuje kao efikasan alat za podršku *evidence-based* odlučivanju u planiranju dekarbonizacije stambenog sektora Bosne i Hercegovine.

LITERATURA

- [1] Arnautović-Aksić D, Burazor M, Delalić N, Gajić D, Kadrić DŽ, Kotur M, Salihović E, Todorović D, Zagora N, *Tipologija stambenih zgrada BIH*, Arhitektonski fakultet Sarajevo, GIZ GmbH, 2016.
- [2] Smajlovic E, Panel Neiskorišteni potencijal energetske efikasnosti u rezidencijalnom sektoru, *Energetski Samit Neum*, 2024.
- [3] Duan et al. *Kina, stambene zgrade, analiza osjetljivosti*, 2019.
- [4] Austrija, grijanje stambenog sektora, dekompozicija, Holzmann & Haas, 2013.
- [5] Smajlović E, Avdić DŽ. et al, *Rehabilitation and Energy Efficiency Upgrades of Public Buildings from Austro-Hungarian Period*, 2016.

- [6] Salihbegović A, Čaušević A, Rustempašić N, Smajlović E. Austro-Hungarian Public Building Refurbishment and Energy Efficiency Measures – A Case Study on a Public Building in Sarajevo, *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering*, 2017.
- [7] Smajlovic E, *LEAP Model for Bosnia and Herzegovina, Low Emission Analysis Platform* Verzija 2025, Stockholm Environmental Institute, 2025.
- [8] IPCC Guideline for National Green House Gas Inventories, Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, 2006.
- [9] Kakalejčíková Z, Smajlovic E, How to improve residential energy efficiency in South Eastern Europe and Commonwealth of Independent States and Georgia, *Habitat for Humanity*, Bratislava, 2017.

SUMMARY

APPLICATION OF THE LEAP MODEL FOR QUANTITATIVE SENSITIVITY ANALYSIS OF CO₂ EMISSIONS FROM THE HEATING SYSTEM OF THE RESIDENTIAL SECTOR OF BOSNIA AND HERZEGOVINA)

This paper presents a quantitative analysis of the sensitivity of CO₂ emissions in the heating sector of residential buildings in Bosnia and Herzegovina, developed using the LEAP (Low Emissions Analysis Platform) model. The research is focused on two subsystems: individual houses that have not been renovated and individual houses that have undergone energy renovation. The analysis includes changes in useful energy per unit area ($QHND_i$) and efficiency of heating technologies (η_i), and their impact on total greenhouse gas emissions in the period 2020–2050. year. The methodological approach includes the calculation of partial elasticities of emissions and the decomposition of the total reduction of emissions into three components: reduction of useful energy, increase in the efficiency of technologies and change in the structure of the housing stock. The results show that total emissions can be reduced by 76% by 2050, with the increase in energy efficiency technologies being the single most significant factor ($\approx 47\%$ of the total reduction). An additional contribution comes from the reduction of useful energy (28%) and the increase in the share of renovated buildings (25%). The analysis of elasticity indicates the transition of the system from the phase of technical sensitivity - when emissions are dominantly dependent on energy consumption in unrenovated houses - to the phase of structural sensitivity, in which the growth of the share of renovated and efficient buildings becomes decisive. Although the methodological framework of the research is based on the analysis of individual residential buildings (renovated and unrenovated houses), it is important to emphasize that the principles and results of this modeling can be fully applied to other types of residential buildings in Bosnia and Herzegovina. According to the Typology of residential buildings in Bosnia and Herzegovina [1], individual houses make up the largest part of the total housing stock, but the energy characteristics of collective housing (multi-apartment buildings) in terms of useful energy, heating system efficiency and renovation trends have similar dynamics. Therefore, the conclusions of the sensitivity analysis - including the impact of useful energy ($Qhnd_i$), efficiency of technologies (η_i) and changes in the structure of the fund - can be considered representative for the entire housing sector, and not only for individual houses. This approach enables the use of the LEAP model to assess the long-term effects of renovation policies in the entire housing sector, regardless of the architectural type of the building. These results confirm that the combination of technical measures (increasing efficiency) and structural changes (deep renovation) represents the optimal path for long-term emission reduction and the achievement of a climate-neutral heating sector by the middle of the century.

Key Words: LEAP model, energy efficiency, deep renovation, sensitivity analysis, decomposition, CO₂ emissions, heating, housing sector, Bosnia and Herzegovina