

Inovativni okvir za ubrzanje
zelene energetske tranzicije u domaćinstvima
Forward-Looking Framework for Accelerating
Households' Green Energy Transition – FF GreEN

**Tehnički izveštaj o LCC (Life Cycle Cost) analizi i redukciji
emisija razmatranih perspektivnih tehnologija zasnovanih na
obnovljivim izvorima energije**

Radni paket 4: Modeliranje naprednih KGH tehnologija zasnovanih na
obnovljivim izvorima energije i optimizovane opcije za energetske
sanacije

NIO: *Univerzitet u Beogradu – Mašinski Fakultet*

Univerzitet u Beogradu – Inovacioni Centar Mašinskog Fakulteta u Beogradu

Univerzitet u Beogradu – Poljoprivredni Fakultet

Univerzitet u Beogradu – Rudarsko Geološki Fakultet

Rukovodilac projekta: *Prof. dr Dejan Ivezić*

Rukovodilac radnog paketa: *Prof. dr Mirko Komatina*

Dokument pripremio: *dr Dimitrije Manić*

Mesto i datum: *Beograd, 1. jul 2026.*

Ovo istraživanje je sprovedeno uz podršku Fonda za nauku Republike Srbije, 4344, Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition – FF GreEN.

This research was supported by the Science Fund of the Republic of Serbia, #GRANT No 4344, Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition - FF GreEN.

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	2
1. Uvod	3
2. Metodologija	3
2.1. Opšti pristup i definicija baznog (referentnog) scenarija	3
2.2. Metodologija LCC (Life Cycle Cost) analize	4
2.3. Metodologija procene redukcije emisija CO ₂	5
2.4. Napomena o razdvajanju energenata za višeporodične zgrade (Soliter, Lamela)	6
3. Ulazni podaci i pretpostavke	6
3.1. Cene energenata za domaćinstva u Srbiji.....	6
3.2. CO ₂ emisioni faktori	6
3.3. Ekonomski parametri LCC analize.....	7
3.4. Investicione cene komponenti (orijentacione, 2025/2026)	7
4. Pregled analiziranih arhetipova i hibridnih rešenja.....	8
5. Rezultati.....	9
5.1. Investicije i LCC rezultati	9
5.2. Redukcija emisija CO ₂	10
6. Diskusija rezultata.....	11
6.1. Ekonomska isplativost: da li je uzrok visoka investicija ili cena/struktura energenata?.....	11
6.2. Emisije CO ₂ i uticaj strukture proizvodnje električne energije u Srbiji	11
6.3. Poređenje hibrida i tipova objekata	12
6.4. Pod kojim uslovima hibridna rešenja postaju ekonomski povoljna?.....	12
7. Ograničenja analize i pretpostavke.....	13
8. Zaključci	14
9. Literatura	15

1. Uvod

Ovaj dokument predstavlja Izveštaj M4.1/D4.3 – Tehnički izveštaj o LCC (Life Cycle Cost) analizi i redukciji emisija razmatranih perspektivnih tehnologija zasnovanih na obnovljivim izvorima energije, pripremljen u okviru Radnog paketa 4 (WP4), u okviru projekta Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition (FF GreEN), koji finansira Fond za nauku Republike Srbije (Grant No 4344).

Izveštaj se metodološki nadovezuje na dva prethodna izveštaja pripremljena u okviru WP4: Izveštaj D4.1 – Modeling-based baseline report (R1), u kome su definisani i modelirani referentni (baseline) energetske scenariji za odabrane arhetipove stambenih objekata, i Izveštaj D4.2 – Tehnički izveštaj o uštedama energije ostvarenim primenom perspektivnih tehnologija zasnovanih na obnovljivim izvorima energije, u kome su kvantifikovane godišnje uštede finalne energije za pojedinačne mere i hibridna rešenja zasnovana na toplotnim pumpama vazduh-voda, solarnim termalnim sistemima i fotonaponskim (PV) sistemima.

Osnovni cilj ovog izveštaja je da se energetske uštede utvrđene u D4.2 prevedu u dve dodatne dimenzije relevantne za donošenje odluka i formulisanje politika: (1) ekonomsku isplativost primene razmatranih hibridnih rešenja, kroz analizu troškova životnog ciklusa (Life Cycle Cost – LCC), uključujući prost period povraćaja investicije i neto sadašnju vrednost (NPV); i (2) efekat na emisije ugljen-dioksida (CO₂), uzimajući u obzir strukturu energenata koji se supstituišu (prirodni gas, daljinsko grejanje) i emisijski faktor elektroenergetske mreže Republike Srbije.

U skladu sa dogovorenim obimom ovog izveštaja, analiza je fokusirana isključivo na hibridna rešenja – kombinaciju toplotne pumpe vazduh-voda sa solarnim termalnim sistemom (TP+ST) ili sa fotonaponskim sistemom (TP+PV) za jednoporodične stambene objekte, odnosno kombinaciju energetske sanacije termičkog omotača sa toplotnom pumpom (Omotač+TP) za višeporodične stambene zgrade (soliter i lamela), u skladu sa jedinim hibridnim rešenjem koje je za ovaj tip objekata razmatrano u D4.2. Pojedinačne (nehibridne) mere nisu predmet ovog izveštaja.

Rezultati ovog izveštaja predstavljaju kvantitativnu osnovu za formulisanje preporuka u okviru FF GreEN metodološkog okvira, uključujući preporuke za politike podsticaja (subvencija) primene OIE tehnologija u domaćinstvima u Srbiji, i predstavljaju direktan ulaz za dalji rad u okviru WP5 i WP6 projekta.

2. Metodologija

2.1. Opšti pristup i definicija baznog (referentnog) scenarija

Analiza u ovom izveštaju polazi od energetske rezultata utvrđenih u D4.1 (referentno/baseline stanje) i D4.2 (uštede energije po tehnologiji i po arhetipu). Za svaki od osam analiziranih scenarija (šest za jednoporodične kuće, dva za višeporodične zgrade) određeni su: (a) potrebna investicija u opremu, na osnovu orijentacionih jediničnih cena i dimenzionisanja predstavljenih u prezentaciji „Hibridni OIE sistemi za stambene objekte” pripremljenoj u okviru projekta; (b) godišnja ušteda troškova energije, na osnovu uštede energije po energentu (D4.2) i cena energenata za domaćinstva u Srbiji; (c) LCC pokazatelji (prost period povraćaja i neto sadašnja vrednost); i (d) godišnja i kumulativna ušteda emisija CO₂.

Ključna metodološka odluka odnosi se na definiciju baznog (referentnog) investicionog scenarija sa kojim se hibridna rešenja porede. Pošto postojeća oprema u svakom trenutku ima preostali (rezidualni) vek trajanja koji se približava nuli, realna odluka pred investitorom/domaćinstvom nije „zadržati postojeću opremu besplatno”, već izbor između dve stvarne investicione alternative u trenutku zamene: (1) like-to-like zamena – kupovina nove opreme iste tehnologije kao i postojeća (npr. nov gasni kotao), ili (2) prelazak na hibridno OIE rešenje. Zato je bazni scenario u ovom izveštaju definisan kao like-to-like zamena, a ne kao nastavak korišćenja postojeće opreme bez ikakve investicije:

- za jednorodnične/dvoporodične kuće (bazno gorivo: prirodni gas, u skladu sa D4.1/D4.2), bazni scenario je kupovina novog kondenzacionog gasnog kotla, iste tehnologije kao postojeći sistem;
- za višeporodične zgrade (soliter, lamela; bazno snabdevanje: daljinsko grejanje), bazni scenario ostaje nastavak snabdevanja daljinskim grejanjem bez investicije na nivou pojedinačnog stana – proizvodno postrojenje i njegovu obnovu/zamenu opreme finansira i o njoj odlučuje JKP Beogradske elektrane, a ne pojedinačni vlasnik stana, tako da za stanara ne postoji analogna „like-to-like” investiciona odluka.

Prema tome, u LCC proračunu se za scenarije jednorodničnih/dvoporodičnih kuća koristi diferencijalna investicija (investicija u hibrid umanjena za izbegnutu investiciju u novi gasni kotao), a ne bruto investicija u hibridnu opremu. Ovakav pristup obezbeđuje korektno poređenje dve realne alternative investitora, umesto poređenja hibrida sa besplatnim nastavkom rada postojeće opreme, što bi neopravdano pogoršalo ekonomsku sliku hibridnih rešenja. Detaljno obrazloženje i brojčane vrednosti dati su u Poglavlju 3.4 i Poglavlju 5.1.

Kompletni proračun, sa svim ulaznim parametrima, formulama i međurezultatima, dat je u pratećem Excel fajlu „FF_GreEN_D4.3_LCC_proracun.xlsx”, koji čini sastavni deo ovog izveštaja. Tabele u ovom poglavlju prikazuju sažete rezultate; za uvid u kompletni proračun (uključujući mogućnost izmene ulaznih pretpostavki) treba koristiti Excel fajl.

2.2. Metodologija LCC (Life Cycle Cost) analize

LCC analiza je sprovedena kroz dva komplementarna pokazatelja, u skladu sa odlukom da se prikažu oba nivoa analize:

- Prost period povraćaja investicije (simple payback) – odnos diferencijalne investicije (videti Poglavlje 2.1) i godišnje uštede troškova energije, izražen u godinama. Pokazatelj je jednostavan za tumačenje, ali ne uzima u obzir vremensku vrednost novca.
- Neto sadašnja vrednost (NPV) – diskontovana razlika uštede troškova tokom veka ekonomske analize i diferencijalne investicije, prema izrazu:

$$NPV = -\Delta I + S \times [(1 - (1 + r)^{-n}) / r]$$

gde je ΔI diferencijalna investicija (EUR; investicija u hibrid umanjena za izbegnutu investiciju u like-to-like zamenu postojeće opreme), S godišnja ušteda troškova energije (EUR/god.), r diskontna stopa, a n vek ekonomske analize (godina). Izraz u uglastoj zagradi predstavlja anuitetni (diskontni) faktor.

Usvojeni vek ekonomske analize iznosi 20 godina, što odgovara gornjoj granici tipičnog tehničkog veka toplotne pumpe vazduh-voda (ASHRAE Equipment Life Expectancy: medijana 15 godina za

rezidencijalne sisteme vazduh-vazduh, 15–20 godina za fabrički pakovane sisteme za grejanje i hlađenje). Pošto je toplotna pumpa zajednička komponenta oba analizirana hibrida i ima najkraći tehnički vek od svih razmatranih komponenti (solarni kolektori: 20–25 god.; fotonaponski paneli: 25–30 god., IRENA/IEA-PVPS 2016; akumulator toplote: 20–25 god.), usvajanjem perioda od 20 godina izbegnuta je potreba za modelovanjem reinvesticije (zamene toplotne pumpe) i rezidualne vrednosti preostale opreme na kraju perioda analize, čime je proračun zadržan u jednostavnim i transparentnim okvirima.

Diskontna stopa od 5% usvojena je prema preporuci iz „EU Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects” (Evropska komisija, 2014) za socijalnu diskontnu stopu u zemljama kohezije/pristupne politike, kojoj Srbija po tretmanu odgovara u okviru IPA politike.

Pored osnovnih LCC pokazatelja, za svaki scenario je izračunata i potrebna kapitalna subvencija (bespovratno sufinansiranje diferencijalne investicije) koja bi bila potrebna da bi NPV dostigao vrednost nula (granica ekonomske isplativosti) u okviru usvojenog perioda i diskontne stope. Ovaj pokazatelj je direktno relevantan za formulisanje preporuka o nivou podsticaja OIE tehnologija (videti Poglavlje 6).

2.3. Metodologija procene redukcije emisija CO₂

Ušteda emisija CO₂ za svaki scenario definisana je kao razlika emisija u referentnom (baznom) stanju i emisija posle implementacije hibridnog rešenja, pri čemu su za obračun korišćeni emisijski faktori energenata koji se supstituišu:

- emisije baznog stanja = potrošnja goriva u baznom stanju (gas ili daljinsko grejanje) × emisijski faktor goriva + potrošnja električne energije u baznom stanju (npr. za pripremu sanitarne tople vode) × emisijski faktor mreže;
- emisije posle mere = potrošnja električne energije toplotne pumpe × emisijski faktor mreže + preostala potrošnja goriva/električne energije × odgovarajući emisijski faktor – (za PV hibride) proizvedena električna energija × emisijski faktor mreže (izbegnuta mrežna proizvodnja).

Napomena: baseline za emisiju analizu (energetski tokovi baznog stanja) ostaje isti kao u D4.1/D4.2 (like-to-like zamena podrazumeva isti energent i približno istu efikasnost kao postojeći sistem, pa nova kupovina kotla ne menja emisiju bilans baznog stanja u odnosu na D4.1/D4.2 vrednosti). Promena metodologije opisana u Poglavlju 2.1 utiče isključivo na LCC (investicione) pokazatelje, ne i na emisiju proračun.

Važno je naglasiti da emisiju faktor elektroenergetске mreže Republike Srbije (0,671 kgCO₂/kWh, procena za 2025. godinu) spada među najviše u Evropi, usled dominantnog učešća lignita u proizvodnji električne energije. Ova činjenica ima direktan i, kako će biti pokazano u Poglavlju 6, ponekad kontraproduktivan uticaj na rezultate redukcije emisija kod mera koje uključuju zamenu direktnog sagorevanja goriva (gas, daljinsko grejanje) električnom energijom iz mreže (toplotna pumpa) – posebno u slučajevima gde nije uključena sopstvena proizvodnja električne energije (PV).

2.4. Napomena o razdvajanju energenata za višeporodične zgrade (Soliter, Lamela)

Za jednoporodične kuće, D4.2 daje jasno razdvojene energetske tokove po energentu za svaku pojedinačnu meru i hibrid, što omogućava direktan obračun troškova i emisija po energentu. Za višeporodične zgrade (soliter, lamela), D4.2 izveštava samo ukupnu finalnu energiju za grejanje posle mere „Omotač+TP” (130.563 kWh za soliter; 204.795 kWh za lamelu), bez podele na preostalu energiju daljinskog grejanja i novu potrošnju električne energije toplotne pumpe – podatak koji je neophodan za LCC/emisionu analizu u ovom izveštaju, pošto se cena i emisioni faktor daljinskog grejanja i električne energije značajno razlikuju.

Da bi se ova podela izvršila na transparentan i sa D4.2 usklađen način, u D4.3 je udeo pokrivanja grejanja toplotnom pumpom (koji D4.2 navodi u opsegu 50–65%, u zavisnosti od tipa zgrade) kalibrisan tako da zbir preostale energije daljinskog grejanja i ekvivalentne električne energije toplotne pumpe (uz usvojeni sezonski COP $\approx 3,0$ za centralni sistem sa prioriternim radom u umerenim spoljašnjim temperaturama) što bliže reprodukuje ukupnu vrednost izveštenu u D4.2. Za soliter je usvojeno 50% (rezultujuća vrednost odstupa $\approx 3,3\%$ od vrednosti u D4.2), a za lamelu 57,5% (odstupanje $< 0,1\%$). Ovim postupkom je omogućena LCC/emisiona analiza uz zadržavanje pune usklađenosti sa rezultatima D4.2, a metodologija i međurezultati su u potpunosti prikazani u pratećem Excel fajlu (list „Arhetipovi”, napomena, i list „LCC i emisije po scenariju”, kolone S–V).

3. Ulazni podaci i pretpostavke

Ovo poglavlje sažima ulazne podatke korišćene u proračunu; potpuna dokumentacija sa izvorima data je u listu „Ulazni parametri” pratećeg Excel fajla.

3.1. Cene energenata za domaćinstva u Srbiji

Energent	Cena	Izvor
Električna energija (prosečna, plava zona, sa PDV)	0,098 EUR/kWh	EPS, cenovnik od 01.10.2025.
Prirodni gas (javno snabdevanje, domaćinstva)	0,038 EUR/kWh	AERS / Srbijagas, 2025/2026.
Daljinsko grejanje (Beograd, obračun po utrošku)	0,073 EUR/kWh	Beogradske elektrane, cenovnik 2026.

Tabela 3-1: Cene energenata usvojene u proračunu (kurs 117,36 RSD/EUR, NBS, jul 2026).

3.2. CO₂ emisioni faktori

Energent	Emisioni faktor	Izvor
Elektroenergetska mreža Srbije	0,671 kgCO ₂ /kWh	Procena za 2025. (Nowtricity, na osnovu Ember/ENTSO-E)
Prirodni gas (direktno sagorevanje)	0,202 kgCO ₂ /kWh	IPCC (2006), 56,1 kgCO ₂ /GJ
Daljinsko grejanje (Beograd)	0,202 kgCO ₂ /kWh	Usvojeno $\approx$ prirodni gas ($\sim 96\%$ gasa u gorivnom miksu BE)

Tabela 3-2: CO₂ emisioni faktori usvojeni u proračunu.

Emisioni faktor mreže Srbije (0,671 kgCO₂/kWh) je među najvišim u Evropi usled dominacije lignita u proizvodnji električne energije, i predstavlja ključnu determinantu rezultata u Poglavlju 6.

3.3. Ekonomski parametri LCC analize

Parametar	Vrednost	Izvor
Diskontna stopa	5%	EU Guide to CBA of Investment Projects (2014)
Vek ekonomske analize	20 godina	D4.3 – gornja granica ASHRAE tehničkog veka TP (15–20 god.)

Tabela 3-3: Ekonomski parametri LCC analize.

3.4. Investicione cene komponenti (orijentacione, 2025/2026)

Komponenta	Cena	Opseg / napomena
Toplotna pumpa vazduh-voda	550 EUR/kW	400–700 EUR/kW
Ravni solarni kolektor	350 EUR/m ²	250–450 EUR/m ²
Fotonaponski sistem (kompletan)	1.500 EUR/kW	1.000–2.000 EUR/kW
Akumulator toplote	$1.000 + 0,9 \times V(l)$ EUR	linearna aproksimacija (1.500–5.000 l)
Nov kondenzacioni gasni kotao (like-to-like, kuće)	1.300 EUR	hardver ~950–1.070 EUR + ugradnja/priključak ~200–300 EUR

Tabela 3-4: Jedinične investicione cene. Cene hibridnih komponenti prema prezentaciji „Hibridni OIE sistemi za stambene objekte” (FF GreEN, 2025); cena gasnog kotla prema aktuelnoj ponudi na tržištu Srbije (2025/2026, videti Poglavlje 9).

Za višeporodične zgrade (soliter, lamela), bazni scenario („like-to-like”, nastavak snabdevanja daljinskim grejanjem) ne uključuje investiciju na nivou pojedinačnog stana, jer proizvodno postrojenje daljinskog grejanja održava i obnavlja JKP Beogradske elektrane, a ne pojedinačni vlasnik stana (videti Poglavlje 2.1).

Sve navedene cene su orijentacione; stvarne tržišne cene mogu značajno varirati u zavisnosti od proizvođača, dobavljača i specifičnih uslova ugradnje. Osetljivost rezultata na ove pretpostavke može se ispitati direktnom izmenom vrednosti u Excel fajlu (list „Ulazni parametri”).

4. Pregled analiziranih arhetipova i hibridnih rešenja

U skladu sa dogovorenim obimom, analizirano je osam scenarija: šest hibridnih rešenja (toplotna pumpa + solarni termalni sistem, odnosno toplotna pumpa + fotonaponski sistem) za tri arhetipa jednorodinih/dvoporodinih kuća, i po jedno hibridno rešenje (energetska sanacija omotača + toplotna pumpa) za dva arhetipa višeporodinih zgrada – u skladu sa jedinim hibridom koji je D4.2 razmatrao za taj tip objekata. Tehnički detalji svakog arhetipa (baseline potrošnja, dimenzionisanje opreme) preuzeti su iz D4.1, D4.2 i prezentacije „Hibridni OIE sistemi za stambene objekte”.

#	Arhetip	Hibrid	Bazno gorivo	TP snaga [kW]	ST/PV veličina	Akumulator [l]
1	Kuća 120 m ²	TP + solarni termal	gas	4,5	4,5 m ²	1.750
2	Kuća 120 m ²	TP + PV	gas	4,5	6,0 kWp	1.750
3	Kuća 200 m ²	TP + solarni termal	gas	7,0	5,5 m ²	2.750
4	Kuća 200 m ²	TP + PV	gas	7,0	8,0 kWp	2.750
5	Dvoporodična kuća (280 m ²)	TP + solarni termal	gas	5,5	7,0 m ²	2.150
6	Dvoporodična kuća (280 m ²)	TP + PV	gas	5,5	8,0 kWp	2.150
7	Zgrada – Soliter	Omotač + TP (centralna)	daljinsko grejanje	95	–	5.000
8	Zgrada – Lamela	Omotač + TP (centralna)	daljinsko grejanje	191	–	5.000

Tabela 4-1: Pregled analiziranih scenarija i njihovog tehničkog dimenzionisanja (D4.1, D4.2, prezentacija „Hibridni OIE sistemi”).

5. Rezultati

U nastavku su prikazani sažeti rezultati LCC i emisije analize za svih osam scenarija. Detaljan proračun sa svim međukoracima dat je u pratećem Excel fajlu (list „LCC i emisije po scenariju”).

5.1. Investicije i LCC rezultati

Kolona „Bazna investicija” predstavlja procenjeni trošak like-to-like zamene postojeće opreme (nov gasni kotao za kuće; 0 za višeporodične zgrade – videti Poglavlje 2.1). Kolona „Diferencijalna investicija” (= investicija u hibrid – bazna investicija) je osnova za prost povraćaj, NPV i potrebnu subvenciju.

#	Arhetip / hibrid	Investicija hibrida (bruto) [EUR]	Bazna investicija [EUR]	Diferenc. investicija [EUR]	Godišnja ušteda [EUR/god]	Prost povraćaj [god]	NPV 20 god./5% [EUR]	Potrebna subvencija za NPV≥0
1	Kuća 120 m ² – TP+ST	6.625	1.300	5.325	242	22,0	–2.312	43%
2	Kuća 120 m ² – TP+PV	14.050	1.300	12.750	730	17,5	–3.650	29%
3	Kuća 200 m ² – TP+ST	9.250	1.300	7.950	257	30,9	–4.744	60%
4	Kuća 200 m ² – TP+PV	19.325	1.300	18.025	980	18,4	–5.811	32%
5	Dvoporodična kuća – TP+ST	8.410	1.300	7.110	248	28,7	–4.019	57%
6	Dvoporodična kuća – TP+PV	17.960	1.300	16.660	971	17,2	–4.561	27%
7	Soliter – Omotač+TP	57.750	0	57.750	3.800	15,2	–10.391	18%
8	Lamela – Omotač+TP	110.550	0	110.550	7.661	14,4	–15.079	14%

Tabela 5-1: LCC rezultati po scenariju, u odnosu na like-to-like bazni scenario (vek analize 20 godina, diskontna stopa 5%). Negativan NPV znači da hibrid nije ekonomski isplativiji od like-to-like zamene u okviru usvojenog perioda bez dodatnog podsticaja; poslednja kolona pokazuje potrebnu kapitalnu subvenciju (na diferencijalnu investiciju) da bi NPV dostigao vrednost nula. Prosečna potrebna subvencija za svih 8 scenarija iznosi ≈35%.

5.2. Redukcija emisija CO₂

Emisiona analiza nije pod uticajem promene metodologije baznog scenarija opisane u Poglavlju 2.1 (like-to-like zamena istim energentom ne menja emisijski bilans baznog stanja u odnosu na D4.1/D4.2).

#	Arhetip / hibrid	Emisije PRE [kgCO ₂ /god]	Emisije POSLE [kgCO ₂ /god]	Ušteda [kgCO ₂ /god]	Ušteda [tCO ₂ / 20 god]	% ušteda
1	Kuća 120 m ² – TP+ST	3.982	2.797	1.185	23,7	30%
2	Kuća 120 m ² – TP+PV	3.982	–558	4.540	90,8	114%
3	Kuća 200 m ² – TP+ST	4.888	3.872	1.016	20,3	21%
4	Kuća 200 m ² – TP+PV	4.888	–1.093	5.981	119,6	122%
5	Dvoporodična kuća – TP+ST	4.352	3.237	1.115	22,3	26%
6	Dvoporodična kuća – TP+PV	4.352	–1.728	6.080	121,6	140%
7	Soliter – Omotač+TP	38.266	40.318	–2.052	–41,0	–5%
8	Lamela – Omotač+TP	67.079	71.216	–4.137	–82,7	–6%

Tabela 5-2: Redukcija emisija CO₂ po scenariju. Negativna ušteda (Soliter, Lamela) znači povećanje emisija – videti diskusiju u Poglavlju 6.2. Kod TP+PV hibrida, % ušteda može biti veći od 100% jer proizvedena PV energija premašuje sopstvenu potrošnju toplotne pumpe i sanitarne tople vode.

6. Diskusija rezultata

6.1. Ekonomska isplativost: da li je uzrok visoka investicija ili cena/struktura energenata?

I posle preformulisanja baznog scenarija kao realne like-to-like investicione alternative (Poglavlje 2.1), nijedan od osam scenarija ne ostvaruje pozitivnu neto sadašnju vrednost (NPV) u okviru 20-godišnjeg perioda i diskontne stope od 5%. Diferencijalna investicija (Tabela 5-1) je, očekivano, niža od bruto investicije u hibrid (za kuće, umanjena za ≈ 1.300 EUR izbegnute kupovine gasnog kotla), što je poboljšalo prost povraćaj (npr. kuća 120 m² TP+ST: sa 27,4 na 22,0 godina) i smanjilo potrebnu subvenciju (prosek sa $\approx 40\%$ na $\approx 35\%$), ali nije bilo dovoljno da promeni predznak NPV ni u jednom scenariju.

Važno je jasno razdvojiti dva različita uzroka koja utiču na različite rezultate ovog izveštaja:

- Ekonomska (NPV/isplativost) neisplativost je posledica isključivo trenutnog odnosa cena energenata u Srbiji, a ne emisionog faktora (ugljeničnog sadržaja) električne energije. Prirodni gas ($\approx 0,038$ EUR/kWh) i daljinsko grejanje ($\approx 0,073$ EUR/kWh) su jeftini u odnosu na električnu energiju ($\approx 0,098$ EUR/kWh); čak i uz COP toplotne pumpe od 2,8–3,0, godišnja ušteda troškova ostaje umerena u odnosu na preostalu (diferencijalnu) investiciju. Emisioni faktor mreže (0,671 kgCO₂/kWh) u ovom proračunu ne ulazi u finansijski proračun (nema karbonske takse/cene CO₂ u Srbiji koja bi to prevela u trošak) – on utiče isključivo na rezultate u Poglavlju 6.2 (emisije), ne na NPV/povraćaj iz Poglavlja 5.1.
- Visina investicije jeste ograničavajući faktor, ali ne jedini: i u scenariju sa najnižom diferencijalnom investicijom u odnosu na uštedu (Lamela: 110.550 EUR investicije naspram 7.661 EUR/god uštede, tj. odnos $\approx 14,4$), period povraćaja i dalje premašuje 12,46 godina – graničnu vrednost anuitetnog faktora za NPV=0 pri 20 god./5%. Dakle, čak i u višeporodičnim zgradama, sam odnos cena energenata čini povraćaj investicije sistematski dužim od 20-godišnjeg horizonta.

Zaključak: ograničena ekonomska isplativost hibrida u Srbiji je pretežno posledica strukture cena energenata (relativno jeftin gas/daljinsko grejanje naspram relativno skupe struje), a ne „priljavog” miksa proizvodnje električne energije – taj faktor je relevantan za emisije (Poglavlje 6.2), ne za finansijski rezultat. Visina investicije dodatno otežava isplativost.

6.2. Emisije CO₂ i uticaj strukture proizvodnje električne energije u Srbiji

Rezultati redukcije emisija pokazuju dva suštinski različita obrasca, koji direktno proizlaze iz visokog emisionog faktora elektroenergetske mreže Srbije (0,671 kgCO₂/kWh), posledice dominantnog učešća lignita u proizvodnji struje.

Za jednoporodične kuće, oba hibrida ostvaruju neto pozitivnu uštedu emisija (21–140%, u zavisnosti od scenarija). Važno je, međutim, naglasiti da sama zamena grejanja na gas toplotnom pumpom, posmatrana izolovano, uz usvojeni sezonski COP od 2,5–3,0 i emisioni faktor mreže od 0,671 kgCO₂/kWh, ne donosi uštedu emisija – naprotiv, emisije po jedinici isporučene toplote za grejanje su nešto više nego kod direktnog sagorevanja gasa (npr. za kuću 120 m²: $0,671/2,8 \approx 0,240$ kgCO₂/kWh za toplotnu pumpu, naspram 0,202 kgCO₂/kWh za gas). Neto pozitivan rezultat za kuće posledica je, dakle, prvenstveno doprinosa solarnog termalnog ili fotonaponskog sistema u smanjenju potrošnje električne energije za pripremu sanitarne tople vode i ostale potrebe domaćinstva, a ne same toplotne pumpe.

Za višeporodične zgrade, kod kojih hibrid ne uključuje solarnu/PV komponentu (u skladu sa obimom D4.2), ovaj efekat postaje dominantan i rezultat je neto povećanje emisija od približno 5–6% u odnosu na bazno (posle sanacije omotača) stanje. Prekidna (break-even) vrednost koeficijenta performansi toplotne pumpe, iznad koje bi zamena daljinskog grejanja toplotnom pumpom donela uštedu emisija pri datom emisionom faktoru mreže, iznosi približno $0,671/0,202 \approx 3,3$. Usvojeni COP od 3,0 za centralne sisteme nalazi se neznatno ispod ove granice.

Ovo je jedan od najvažnijih nalaza ovog izveštaja sa stanovišta formulisanja politika: u trenutnim uslovima elektroenergetskog sistema Srbije, elektrifikacija grejanja u višeporodičnim zgradama putem toplotnih pumpi, bez praćene sopstvene proizvodnje električne energije iz OIE (npr. krovni fotonaponski sistemi) ili bez napretka u dekarbonizaciji mreže, ne mora nužno doneti smanjenje emisija CO₂ – uprkos značajnoj uštedi finalne energije i troškova.

6.3. Poređenje hibrida i tipova objekata

Fotonaponski hibrid (TP+PV) sistematski nadmašuje solarni termalni hibrid (TP+ST) i po ekonomskim i po ekološkim pokazateljima kod jednoporodičnih kuća, zahvaljujući većoj vrednosti proizvedene električne energije u odnosu na uštedu goriva za pripremu tople vode. Solarni termalni hibrid zahteva približno upola manju investiciju, što ga čini pristupačnijom opcijom za domaćinstva sa ograničenim investicionim kapacitetom, uprkos slabijim ukupnim pokazateljima.

Višeporodične zgrade predstavljaju karakterističan kompromis: najkraći prost period povraćaja od svih osam scenarija, ali i jedini scenariji sa neto povećanjem emisija. Ovo ukazuje da ekonomski najatraktivnija opcija za brzu primenu (centralizovane toplotne pumpe u višeporodičnim zgradama) nije nužno i ekološki najpovoljnija opcija, što je ključna informacija za dizajniranje diferenciranih mera podrške i regulatornih zahteva po tipu objekta.

6.4. Pod kojim uslovima hibridna rešenja postaju ekonomski povoljna?

Na osnovu strukture proračuna (Poglavlje 2, Poglavlje 5), NPV analiziranih hibrida bio bi pozitivan (bez potrebe za subvencijom) ukoliko bi se ostvario jedan od sledećih uslova, ili njihova kombinacija:

- Kapitalna subvencija u iznosu utvrđenom u Tabeli 5-1 (14–60%, prosečno $\approx 35\%$) – najdirektniji i u kratkom roku najrealističniji instrument, pošto ne zavisi od kretanja na energetskim tržištima.
- Sužavanje odnosa cena gasa/daljinskog grejanja i električne energije – npr. rast cene prirodnog gasa i daljinskog grejanja (usklađivanje sa evropskim tržišnim cenama) i/ili uvođenje povoljnije (npr. namenske noćne/HP) tarife za električnu energiju domaćinstava sa toplotnim pumpama, po ugledu na prakse u pojedinim zemljama EU.
- Sniženje investicionih troškova opreme – kroz efekat krive učenja, lokalnu proizvodnju/montažu, ukidanje uvoznih dažbina na opremu za OIE, ili subvencionisane kredite sa niskom kamatnom stopom (koji efektivno smanjuju diskontnu stopu za investitora).
- Uvođenje cene/takse na emisije CO₂ za fosilna goriva u sektoru domaćinstava (npr. u okviru usklađivanja sa EU ETS2 direktivom za zgrade i saobraćaj) – ovo bi povećalo relativnu cenu baznog scenarija (gas/daljinsko grejanje), a ne cenu električne energije, čime bi se poboljšala isplativost hibrida bez potrebe da struja postane jeftinija.

- Veći stepen sopstvene potrošnje/otkupa viška PV proizvodnje (formalizovana šema net-meteringa ili povoljnijeg otkupa), što bi dodatno poboljšalo pokazatelje TP+PV hibrida, koji već pokazuju najbolje rezultate od svih razmatranih opcija.

Za cilj redukcije emisija CO₂ (za razliku od cilja ekonomske isplativosti), ključan uslov je nezavisan od cena energenata: dekarbonizacija elektroenergetske mreže Srbije (smanjenje udela lignita) i/ili uparivanje toplotnih pumpi sa sopstvenom proizvodnjom OIE električne energije – posebno važno za višeporodične zgrade, gde trenutno (Poglavlje 6.2) dolazi do neto povećanja emisija.

7. Ograničenja analize i pretpostavke

- Jedinične investicione cene opreme (toplotna pumpa, solarni kolektori, PV, akumulator) u skladu su sa vrednostima prethodno korišćenim u okviru projekta i predstavljaju prosečne tržišne vrednosti za 2025 i 2026. godinu, a ne konkretne ponude dobavljača; stvarni troškovi konkretne investicije mogu odstupati.
- Cena like-to-like baznog scenarija (nov gasni kotao, 1.300 EUR) je procenjena na osnovu tipične ponude na tržištu Srbije za kondenzacione kombinovane kotlove (24–30 kW, sa osnovnom ugradnjom); ne uključuje eventualnu zamenu radijatora/razvoda, što je konzistentno sa tretmanom hibridnih rešenja (koja takođe ne uključuju trošak zamene razvoda).
- Za višeporodične zgrade (soliter, lamela), podela energije posle mere na preostalu energiju daljinskog grejanja i novu potrošnju električne energije toplotne pumpe, kao i procena grejane površine i instalisane snage toplotne pumpe, predstavljaju inženjerske procene kalibrisane da budu usklađene sa ukupnim rezultatom D4.2 (videti Poglavlje 2.4), a ne izvorne D4.1/D4.2 podatke.
- Cene energenata odražavaju stanje sredinom 2026. godine i podložne su promeni; posebno cena električne energije i prirodnog gasa mogu varirati usled kretanja na regionalnom energetskom tržištu.
- Emisioni faktor elektroenergetske mreže Srbije (0,671 kgCO₂/kWh) predstavlja godišnji prosek za 2025. i tokom 20-godišnjeg perioda analize će se verovatno smanjivati usled planirane dekarbonizacije proizvodnje električne energije, što nije eksplicitno modelovano (korišćena je konstantna vrednost za ceo period, konzervativan pristup za scenarije sa neto povećanjem emisija).
- Analiza ne uključuje reinvesticiju niti rezidualnu vrednost opreme na kraju 20-godišnjeg perioda (videti Poglavlje 2.2).
- Kod fotonaponskih hibrida usvojena je pretpostavka potpune prioritetne sopstvene potrošnje proizvedene električne energije, vrednovane po maloprodajnoj ceni struje; u odsustvu formalizovane šeme neto merenja (net-metering) ili povoljnog otkupa viška energije, stvarna ekonomska vrednost dela proizvodnje koji se predaje u mrežu mogla bi biti niža.
- Usvojeno učešće više dnevne tarife u potrošnji električne energije (55%) i odgovarajuća prosečna cena struje predstavljaju pretpostavku, a ne izmereni profil potrošnje konkretnog domaćinstva.
- Analiza ne uključuje cenu/taksu na emisije CO₂ za fosilna goriva (u Srbiji trenutno ne postoji); uvođenje takve mere bi izmenilo relativnu isplativost u korist hibridnih rešenja (videti Poglavlje 6.4).

8. Zaključci

Ovaj izveštaj je sproveo LCC (Life Cycle Cost) i emisiju analizu hibridnih rešenja zasnovanih na toplotnoj pumpi vazduh-voda u kombinaciji sa solarnim termalnim ili fotonaponskim sistemom (za jednorodnične/dvoporodične kuće), odnosno u kombinaciji sa energetskom sanacijom termičkog omotača (za višeporodične zgrade), nastavljajući se na energetske rezultate utvrđene u izveštajima D4.1 i D4.2. Bazni scenario je definisan kao realna investiciona alternativa – like-to-like zamena postojeće opreme – a ne kao besplatan nastavak rada postojećeg sistema, čime je obezbeđeno korektno poređenje dve stvarne opcije investitora.

Ključni nalazi su sledeći:

- Nijedan od osam analiziranih scenarija ne dostiže pozitivnu neto sadašnju vrednost u okviru 20-godišnjeg perioda analize pri trenutnim, nesubvencionisanim cenama energenata u Srbiji; potrebna kapitalna subvencija za dostizanje granice isplativosti ($NPV=0$) kreće se od 14% do 60% (prosečno $\approx 35\%$), u zavisnosti od tipa objekta i hibrida.
- Ograničena ekonomska isplativost je pretežno posledica odnosa cena energenata u Srbiji (relativno jeftin gas/daljinsko grejanje naspram relativno skupe struje), a ne emisijom (ugljeničnog) sadržaja električne energije – taj faktor utiče isključivo na emisije, ne i na finansijske rezultate, pošto u Srbiji trenutno ne postoji cena/taksa na CO₂ emisije iz domaćinstava.
- Fotonaponski hibrid (TP+PV) je ekonomski i ekološki povoljniji od solarnog termalnog hibrida (TP+ST) kod jednorodničnih kuća, ali zahteva približno duplo veću investiciju.
- Centralizovani sistemi u višeporodičnim zgradama imaju najkraći prost period povraćaja (14–15 godina) usled ekonomije obima, ali su, u odsustvu sopstvene proizvodnje električne energije iz OIE, jedini analizirani scenariji kod kojih dolazi do neto povećanja emisija CO₂ (5–6%), usled visokog emisijog faktora elektroenergetske mreže Srbije (prekidni COP $\approx 3,3$, naspram usvojenog COP=3,0).
- Uslovi pod kojima bi hibridi postali ekonomski isplativi bez subvencije uključuju: sužavanje odnosa cena gasa/daljinskog grejanja i struje, snižavanje investicionih troškova opreme, ili uvođenje cene CO₂ emisija za fosilna goriva u domaćinstvima (Poglavlje 6.4); za cilj redukcije emisija, ključan je napredak dekarbonizacije mreže i/ili uparivanje toplotnih pumpi sa sopstvenom OIE proizvodnjom struje, uključujući i višeporodične zgrade.

Rezultati ovog izveštaja biće korišćeni kao kvantitativna osnova za formulisanje diferenciranih politika podsticaja OIE tehnologija u domaćinstvima u Srbiji (WP5), kao i da se u okviru studije slučaja odabrane opštine (WP6) razmotri scenario koji uključuje sopstvenu proizvodnju električne energije iz OIE i za višeporodične zgrade.

9. Literatura

FF GreEN – WP4 – D4.1. Modeling-based baseline report (R1), decembar 2024.

FF GreEN – WP4 – D4.2. Tehnički izveštaj o uštedama energije ostvarenim primenom perspektivnih tehnologija zasnovanih na obnovljivim izvorima energije, decembar 2025.

FF GreEN – Hibridni OIE sistemi za stambene objekte, prezentacija projektnog tima, 2025.

F1a Part A FF GreEN – Project Description – Part A, 30.09.2022.

F1b Part B FF GreEN – Project Description – Part B, 30.09.2022.

Elektroprivreda Srbije (EPS) – Cenovnik za garantovano snabdevanje električnom energijom, na snazi od 01.10.2025.

Agencija za energetiku Republike Srbije (AERS) / JP Srbijagas – Cene prirodnog gasa za javno snabdevanje, 2025/2026.

JKP Beogradske elektrane – Cenovnik usluge grejanja (obračun prema utrošku), 2026.

Narodna banka Srbije (NBS) – Kursna lista, srednji kurs EUR/RSD, jul 2026.

Tržišne cene kondenzacionih gasnih kotlova za domaćinstva u Srbiji (Termocelik, Kotlovi na gas, Doming, Valdom, Gradnja.rs), 2025/2026.

IPCC – 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy, Chapter 2 – Stationary Combustion.

Nowtricity – CO2 emissions per kWh in Serbia (procena na osnovu Ember/ENTSO-E podataka), 2025.

ASHRAE – Equipment Life Expectancy Chart (HVAC Equipment Service Life).

IRENA and IEA-PVPS – End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels, 2016.

Evropska komisija – Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects – Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020, 2014.