

Иновативни оквир за убрзање
зелене енергетске транзиције у домаћинствима
Forward-Looking Framework for Accelerating
Households' Green Energy Transition – FF GreEN

**Технички извештај о уштедама енергије оствареним
применом перспективних технологија заснованих на
обновљивим изворима енергије**

Радни пакет 4: Моделирање напредних КГХ технологија
заснованих на обновљивим изворима енергије и оптимизоване
опције за енергетску санацију

НИО : Универзитет у Београду – Машински Факултет

Универзитет у Београду – Иновациони Центар Машинског Факултета у Београду

Универзитет у Београду – Пољопривредни Факултет

Универзитет у Београду – Рударско Геолошки Факултет

Руководилац пројекта: Проф. др Дејан Ивезић

Руководилац радног пакета: Проф. др Мирко Коматина

Документ припремио: др Димитрије Манић

Место и датум: Београд, децембар 2025.

Ово истраживање је спроведено уз подршку Фонда за науку Републике Србије, 4344, 'Fowrward 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, 'Fowrward Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition – FF GreEN.

САДРЖАЈ

1	Увод	3
2	Методологија	4
2.1	Обухват анализе и типови разматраних зграда	4
2.2	Дефиниција референтног стања (baseline)	5
2.3	Методологија процене уштеда енергије	5
2.4	Динамичка симулација енергетских перформанси	6
2.5	Предуслов енергетске санације термичког омотача за једнопородичне и двопородичне куће	6
2.6	Методологија анализе појединачних мера и хибридних решења	7
2.7	Тумачење резултата и значење појединачних колона у табелама	7
3	Опис разматраних зграда	8
3.1	Породичне куће	8
3.2	Вишепородичне стамбене зграде – WP4 архетипи	11
4	Опис разматраних мера за уштеду енергије	13
4.1	Топлотне пумпе ваздух–вода	13
4.2	Соларни термални системи за припрему санитарне топле воде	15
4.3	Фотонапонски системи за производњу електричне енергије	16
5	Резултати динамичких симулација	18
5.1	Породична кућа – 120 m ²	18
5.2	Породична кућа – 200 m ²	19
5.3	Двопородична кућа	20
5.4	Стамбене зграде	21
5.5	Објашњење мера за вишепородичне стамбене зграде (солитери и ламеле)	22
6	Дискусија резултата	23
6.1	Општа запажања и методолошки контекст	23
6.2	Једнопородичне и двопородичне куће	23
6.3	Вишепородичне стамбене зграде	24
6.4	Импликације за FF GreEN оквир	24
7	Закључци	25
8	Списак литературе	26

1 Увод

Овај документ представља Извештај D4.2 – Технички извештај о уштедама енергије оствареним применом перспективних технологија заснованих на обновљивим изворима енергије, који је припремљен у оквиру Радног пакета 4 (WP4), Подактивност 4.2 – Енергетско моделовање појединачних мера за уштеду енергије, у оквиру пројекта Forward Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition (FF GreEN).

Основни циљ овог извештаја је да се, применом динамичке симулације енергетских перформанси зграда, квантификују потенцијалне уштеде енергије и одговарајуће редукције емисија које се могу остварити имплементацијом појединачних мера заснованих на обновљивим изворима енергије (ОИЕ). Анализа је усмерена на мере које су у претходним фазама пројекта (WP2) идентификоване као технички изводљиве и релевантне за стамбени сектор, са посебним фокусом на породичне куће и вишепородичне стамбене зграде.

Овај извештај се методолошки надовезује на Извештај D4.1 – Modeling-based baseline report (R1), у коме су дефинисани и моделирани референтни сценарији (baseline) за одабране типологије стамбених зграда. У оквиру извештаја D4.2, ти референтни модели се користе као полазна основа за процену ефеката имплементације појединачних ОИЕ и хибридних мера, без поновног дефинисања или калибрације baseline сценарија.

Важно је нагласити да се у овом извештају не разматрају интегрисани пакети мера, већ се свака мера анализира појединачно. Овакав приступ омогућава јасно идентификовање доприноса сваке технологије укупним уштедама енергије и боље разумевање њене применљивости у различитим типовима стамбених објеката.

Сви резултати приказани у извештају засновани су на динамичкој симулацији енергетских перформанси зграда у софтверском окружењу IES Virtual Environment (IESVE). Приказане вредности уштеда енергије представљају резултат поређења референтне потрошње енергије (baseline) и потрошње енергије након имплементације појединачних мера, под истим климатским и оперативним условима.

2 Методологија

2.1 Обухват анализе и типови разматраних зграда

Анализа у оквиру овог извештаја обухвата репрезентативне типологије стамбених зграда које су карактеристичне за постојећи стамбени фонд у Србији. Разматране су две основне групе објеката: породичне куће и вишепородичне стамбене зграде.

За породичне куће анализирана су два архетипска објекта различите површине (120 m² и 200 m²), који представљају типичне самосталне стамбене објекте након спроведених основних мера енергетске санације. Поред тога, укључен је и један архетип породичне куће који је детаљно моделиран у оквиру WP4 и коришћен у претходним анализама.

За вишепородичне стамбене зграде, разматрана су два архетипа дефинисана у оквиру WP4: високоспратна стамбена зграда (солитер) и ламелна стамбена зграда. Ови објекти представљају доминантне типологије колективног становања у урбаним срединама и карактеришу се централизованим системима грејања.

Овим избором објеката обезбеђен је довољно широк спектар типологија који омогућава процену применљивости и ефеката ОИЕ мера у различитим стамбеним контекстима.

У D4.1 су анализирани реални објекти (слободностојећа кућа са две стамбене јединице, стамбена зграда велике спратности – солитер, и стамбена зграда типа ламела) коришћењем типичне метеоролошке године за Београд. Резултати су калибрисани на основу измерених података и анкета, са фокусом на потрошњу по крајњим корисницима (нпр. грејање доминира са 42-85 % укупне потрошње) и по енергентима.

Ове baseline вредности служе као основа за процену уштеда у овом извештају, где се симулирају ефекти ОИЕ технологија. Кључне референтне годишње вредности финалне потрошње енергије по енергентима из D4.1 су сажете у следећој табели:

Тип зграде	Природни гас / Даљинско грејање (kWh)
Слободностојећа кућа са две стамбене јединице	38,551
Стамбена зграда - солитер (даљинско грејање)	510,670
Стамбена зграда – ламела (даљинско грејање)	597,979

Ове вредности представљају референтно стање пре примене мера за уштеду енергије и користе се за поређење са симулираним хибридним решењима у овом извештају. За детаљније расподеле по месецима и крајњим корисницима, погледати D4.1 (резултати симулација на странама 11-22).

2.2 Дефиниција референтног стања (baseline)

Референтно стање (baseline) за све анализиране зграде дефинисано је и моделирано у оквиру Извештаја D4.1 – Modeling-based baseline report (R1). Baseline модели представљају енергетске перформансе зграда у постојећем стању, пре имплементације мера заснованих на обновљивим изворима енергије.

У оквиру WP4 – D4.1, референтни модели су развијени коришћењем динамичке симулације у софтверском пакету IESVE, при чему су узети у обзир:

- геометрија и термички омотач зграда,
- постојећи системи грејања и припреме санитарне топле воде,
- интерни топлотни добици и обрасци коришћења простора,
- типични метеоролошки подаци за анализирано подручје.

У овом извештају, baseline сценарији се користе као фиксна полазна основа и не подлежу додатним изменама. Све процене уштеда енергије заснивају се на директном поређењу резултата baseline симулација и резултата симулација након имплементације појединачних мера.

2.3 Методологија процене уштеда енергије

Процена уштеда енергије у оквиру овог извештаја заснива се на јасно дефинисаном и транспарентном приступу, који је у складу са добром праксом у области енергетског моделовања зграда.

Уштеда енергије за сваку разматрану меру дефинисана је као разлика између годишње финалне потрошње енергије у референтном стању и годишње финалне потрошње енергије након имплементације мере, и може се изразити на следећи начин:

уштеда енергије = потрошња енергије у референтном стању – потрошња енергије након имплементације мере

Прорачун уштеда врши се:

- на годишњем нивоу,
- за типичну метеоролошку годину,
- под идентичним граничним условима (коришћење простора, унутрашње температуре, распореди рада система).

На овај начин обезбеђује се да су уочене разлике у потрошњи енергије искључиво последица имплементације анализираних мера.

2.4 Динамичка симулација енергетских перформанси

Све анализе у оквиру овог извештаја засноване су на динамичкој симулацији енергетских перформанси зграда, спроведеној у софтверском окружењу IES Virtual Environment (IESVE). Динамичка симулација омогућава моделовање променљивих интеракција између зграде, техничких система и спољашњих климатских услова током целе године, на часовном временском кораку.

Посебна пажња посвећена је адекватном моделовању перформанси система заснованих на обновљивим изворима енергије. Код топлотних пумпи, капацитет и коефицијент перформанси (COP) моделирани су као функција спољашње температуре ваздуха, чиме се реалистично обухвата утицај климатских услова на ефикасност система током грејне сезоне.

Код соларних термалних и фотонапонских система, у симулацији су узети у обзир положај сунца, интензитет сунчевог зрачења, облачност и ефикасност система. На овај начин је омогућено реалистично моделовање сезонских и дневних варијација производње енергије из сунчевих извора.

Примена динамичке симулације обезбеђује поуздану основу за поређење различитих мера и омогућава да се резултати користе као релевантан улаз за даље фазе пројекта FF GreEN.

2.5 Предуслов енергетске санације термичког омотача за једнопородичне и двопородичне куће

У оквиру овог извештаја усвојен је принцип да имплементација система заснованих на обновљивим изворима енергије, као и појединачних мера које укључују такве системе, има смисла тек након спровођења основне енергетске санације термичког омотача зграде. Овај приступ је у складу са важећим европским и националним смерницама за унапређење енергетских перформанси зграда, које дају приоритет смањењу топлотних губитака пре увођења напредних техничких система.

За све једнопородичне и двопородичне куће обухваћене анализом у оквиру Deliverable D4.2 – укључујући теоријске моделе кућа површине 120 m² и 200 m², као и породичну кућу дефинисану као WP4 архетип – претпостављено је да је термички омотач зграде претходно унапређен најмање до енергетског разреда C. Ово одговара специфичној годишњој потреби енергије за грејање од приближно 75 kWh/m².

Иако је у Извештају D4.1 (Modeling-based baseline report, R1) породична кућа WP4 архетип анализирана у изворном стању, у оквиру овог извештаја она се посматра као зграда код које је претходно спроведена санација омотача до наведеног нивоа. На тај начин обезбеђена је методолошка доследност између свих једнопородичних објеката и реалистична основа за процену ефеката обновљивих извора енергије.

Тако дефинисано стање након санације омотача представља референтно стање за даљу анализу у оквиру Deliverable D4.2.

2.6 Методологија анализе појединачних мера и хибридних решења

Процена уштеда енергије извршена је применом динамичке симулације у софтверском пакету IES Virtual Environment (IESVE). За све објекте коришћени су идентични климатски подаци (типична метеоролошка година), профили коришћења и гранични услови, како би резултати били међусобно упоредиви.

Уштеде енергије дефинисане су као разлика између потрошње енергије у референтном стању (након санације омотача, где је применљиво) и потрошње енергије након имплементације појединачне мере или комбинације мера, у складу са следећим изразом:

уштеда енергије = потрошња енергије у референтном стању – потрошња енергије након имплементације мере

2.7 Тумачење резултата и значење појединачних колона у табелама

У табелама са резултатима приказани су ефекти различитих мера које не утичу на исте енергетске токове. Ради прегледности, све мере су приказане у оквиру истих табела, али је у тексту и у насловима колона јасно назначено на коју врсту енергије се поједина мера односи.

- Соларни термални системи не утичу на енергију за грејање, већ смањују потрошњу енергије за припрему санитарне топле воде. У табелама је овај ефекат приказан посебно и не сме се тумачити као уштеда енергије за грејање.
- Фотонапонски системи производе електричну енергију која смањује нето потрошњу електричне енергије објекта. Производња електричне енергије из фотонапонских система није везана за конкретну намену (грејање, санитарна топла вода или остала потрошња), већ представља укупни енергетски допринос система.

Оваквим приступом омогућено је да се у једној табели прикажу различите мере, уз јасно раздвајање њихових ефеката и без мешања термичких и електричних енергетских токова.

3 Опис разматраних зграда

У овом поглављу дат је сажет, али технички јасан опис стамбених објеката који су обухваћени анализом у оквиру Извештаја D4.2. Опис зграда има за циљ да пружи довољно информација за разумевање контекста симулација и интерпретацију резултата, без детаљног понављања садржаја који је већ обрађен у оквиру Извештаја D4.1 – Modeling-based baseline report (R1).

Сви објекти анализирани у овом извештају моделирани су као репрезентативни архетипови који одражавају карактеристике постојећег стамбеног фонда у Србији, са аспекта геометрије, термичког омотача, система грејања и начина коришћења.

3.1 Породичне куће

3.1.1 Породична кућа – 120 m²

Овај архетип представља самосталну породичну кућу са укупном грејаном површином од 120 m². Објекат је моделован као двоспратна зграда са типичном организацијом простора за ову категорију становања, при чему су дневне просторије лоциране у приземљу, а спаваће просторије на спрату.

За потребе анализе мера заснованих на обновљивим изворима енергије, објекат је третиран као зграда у стању након спроведених основних мера енергетске санације, што подразумева побољшане термичке карактеристике омотача у односу на оригинално стање. Ова претпоставка омогућава реалистично димензионисање и процену перформанси система као што су топлотне пумпе и соларни системи.

Референтни систем грејања у baseline сценарију одговара конвенционалном систему који се типично примењује у породичним кућама, а детаљне карактеристике система и термичког омотача дефинисане су у складу са приступом коришћеним у WP4.



Слика 1: Типичан изглед породичне куће површине 120 m² и приказ геометрије модела у IESVE.

3.1.2 Породична кућа – 200 m²

Други архетип породичне куће представља самостални стамбени објект са укупном грејаном површином од 200 m². У питању је већи породични објект са израженијим укупним потребама за енергијом за грејање и припрему санитарне топле воде у односу на мању кућу.

Као и код архетипа од 120 m², објект је моделован као зграда након спроведених основних мера енергетске санације. На тај начин омогућено је да се утицај анализираних мера заснованих на обновљивим изворима енергије посматра у реалистичном контексту, у којем су губици зграде смањени, а системи пројектовани за нискотемпературни режим рада.

Референтни системи, профили коришћења и климатски подаци примењени у моделу усклађени су са општом методологијом описаном у Поглављу 2 и обезбеђују упоредивост резултата са осталим анализираним објектима.



Слика 2: Типичан изглед породичне куће површине 200 m² и приказ геометрије модела у IESVE.

3.1.3 Напомена о природи модела породичних кућа (120 m² и 200 m²)

Важно је напоменути да архетипови породичних кућа површине 120 m² и 200 m² који су анализирани у овом извештају представљају теоријске моделе, а не конкретне објекте преузете из катастра, са терена или из литературе. Ови модели су дефинисани као концептуални, репрезентативни примери породичних стамбених објеката, са карактеристикама које су типичне за значајан део постојећег стамбеног фонда.

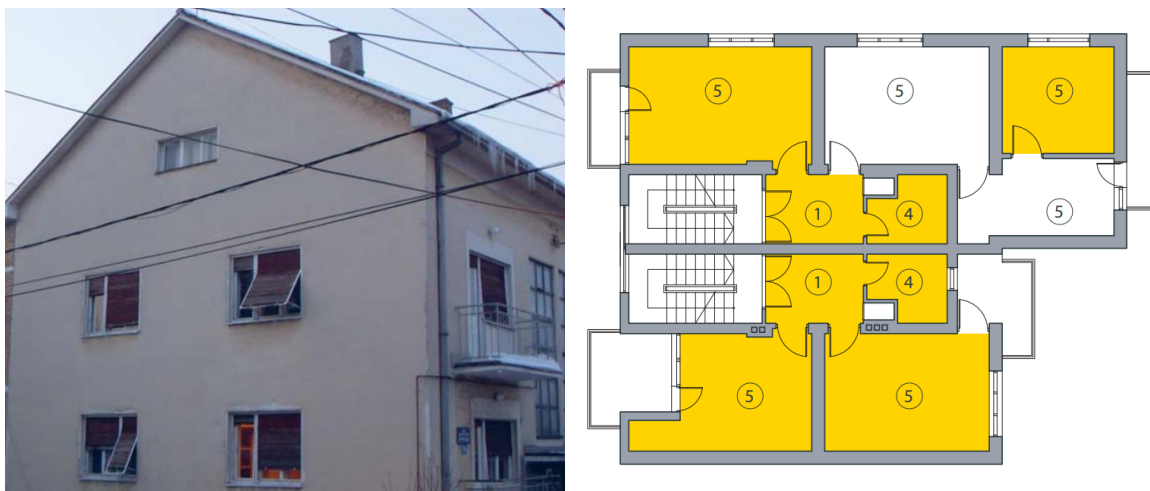
Циљ примене теоријских модела је да се омогући јасна и контролисана анализа утицаја појединачних мера заснованих на обновљивим изворима енергије, без специфичности које би биле везане за појединачне реалне објекте. На овај начин добијени резултати остају довољно општи да се могу лако пренети на праксу и применити на велики број стварних породичних кућа сличне величине и намене.

3.1.4 Породична кућа – WP4 архетип

Овај архетип представља породичну стамбену зграду која је детаљно анализирана у оквиру WP4 и приказана у Извештају D4.1 – Modeling-based baseline report (R1). Објекат је дефинисан као репрезентативан пример породичне куће изграђене у периоду од 1970. до 1980. године, са масивном конструкцијом и класичним распоредом просторија.

Зграда има више етажа и симетричну организацију стамбених јединица, са карактеристичним конструктивним и термичким особинама за период изградње. Термички омотач објекта, прозорски отвори и системи грејања моделовани су у складу са стварним карактеристикама објекта, како је детаљно описано у WP4 извештају.

У оквиру овог извештаја, наведени архетип је укључен ради обезбеђивања континуитета између baseline анализе и процене ефеката појединачних ОИЕ мера. Сви резултати за овај објекат директно се надовезују на референтне вредности дефинисане у WP4.



Слика 3: Изглед и архитектонске основе моделираног објекта (тип D1, [1])



Слика 4:

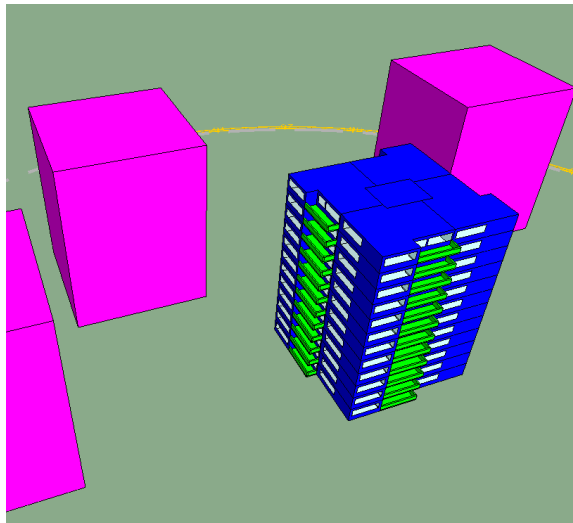
3.2 Вишепородичне стамбене зграде – WP4 архетипи

3.2.1 Вишепородична стамбена зграда – солитер

Први архетип вишепородичне стамбене зграде представља високоспратни стамбени објект (солитер), карактеристичан за масовну стамбену изградњу у урбаним срединама. Зграда је дефинисана и моделирана у оквиру WP4, са детаљно описаним геометријским, конструктивним и енергетским карактеристикама.

Објект има централизован систем грејања, са значајним укупним годишњим потребама за топлотном енергијом. Карактеристике термичког омотача и прозорских отвора одражавају типичне услове за период изградње, са делимичним заменама столарије током експлоатације.

У овом извештају, солитер је анализиран као репрезентативан пример вишепородичне зграде код које је примена централних хибридних система, као што су топлотне пумпе ваздух–вода, технички и организационо најизводљивија.



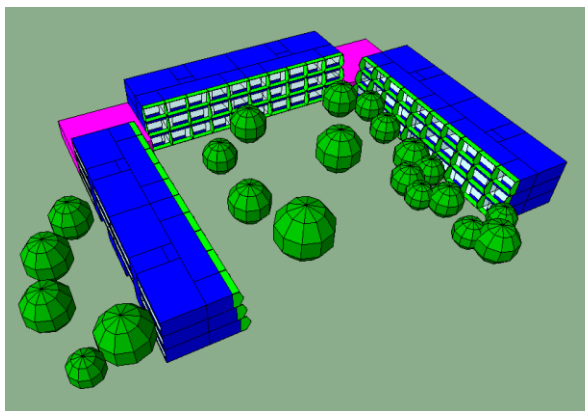
Слика 5: Вишепородична стамбена зграда – солитер (фотографија и IESVE модел).

3.2.2 Вишепородична стамбена зграда – ламела

Други архетип вишепородичне стамбене зграде представља ламелну зграду, која је широко заступљена у постојећем стамбеном фонду. Објекат је такође детаљно анализиран у оквиру WP4 и служи као репрезентативан пример зграде са издуженом основом и релативно великом површином омотача у односу на корисну површину.

Ламелна зграда има централизован систем грејања и карактерише се израженим топлотним губицима кроз фасадне зидове и прозорске површине. Ове карактеристике имају значајан утицај на апсолутни и релативни потенцијал уштеда енергије при имплементацији мера заснованих на обновљивим изворима енергије.

Укључивањем овог архетипа у анализу омогућено је сагледавање ефеката истих мера на различите типове вишепородичних објеката, што доприноси широј применљивости резултата извештаја.



Слика 6: Вишепородична стамбена зграда – ламела (фотографија и IESVE модел).

4 Опис разматраних мера за уштеду енергије

У овом поглављу описане су мере за уштеду енергије засноване на обновљивим изворима енергије које су анализиране у оквиру Извештаја D4.2. Одабране мере представљају технологије које су, на основу резултата WP2, препознате као технички изводљиве, енергетски ефикасне и релевантне за примену у стамбеном сектору.

Све мере су анализиране као појединачне интервенције, при чему је њихов утицај на енергетске перформансе зграда процењен у односу на референтно стање (baseline) дефинисано у WP4 – D4.1. Мере су примењиване у складу са типологијом зграда, односно поједине технологије су разматране искључиво за породичне куће, док су друге анализиране и за вишепородичне стамбене зграде.

4.1 Топлотне пумпе ваздух–вода

4.1.1 Опис мере и принцип рада

Топлотне пумпе ваздух–вода представљају систем за грејање и припрему санитарне топле воде који користи енергију спољашњег ваздуха као обновљиви извор топлоте. Систем функционише на принципу компресорског термодинамичког циклуса, при чему се топлотна енергија из ваздуха преноси на водени систем грејања унутар објекта.

Ова технологија је посебно погодна за примену у стамбеним зградама јер омогућава значајно смањење потрошње финалне енергије и емисија, уз релативно једноставну интеграцију у постојеће системе грејања, нарочито у објектима са нискотемпературним режимом рада.

4.1.2 Примена у породичним кућама

Код породичних кућа (120 m² и 200 m², као и WP4 архетип), топлотне пумпе ваздух–вода разматране су као примарни системи који у потпуности замењују постојећи систем грејања у референтном стању. У овом сценарију, топлотна пумпа обезбеђује енергију за грејање простора и припрему санитарне топле воде, док је функција хлађења укључена тамо где је релевантна.

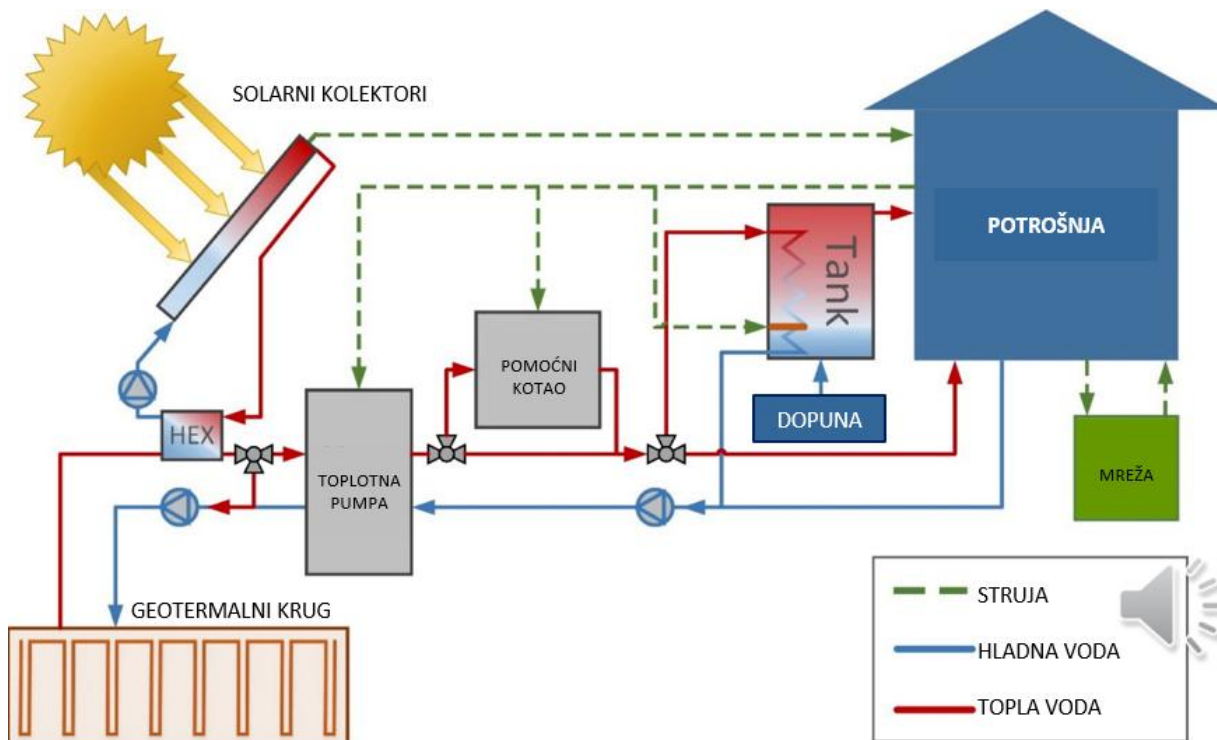
Претпоставља се да су породичне куће опремљене системима дистрибуције топлоте који омогућавају нискотемпературни режим рада, као што су подно грејање или радијатори димензионисани за ниже температуре полазне воде. Ова претпоставка је у складу са сценаријем основне енергетске санације зграде и омогућава постизање виших сезонских коефицијената перформанси топлотне пумпе.

4.1.3 Примена у вишепородичним стамбеним зградама

За вишепородичне стамбене зграде (солитер и ламела), топлотне пумпе ваздух–вода анализиране су искључиво као део хибридног система. У овом приступу, топлотна пумпа је инсталирана као централни систем на нивоу објекта и ради паралелно са постојећим централизованим системом грејања.

Топлотна пумпа је димензионисана тако да покрива базно оптерећење грејања током већег дела грејне сезоне, док постојећи систем преузима покривање вршних оптерећења у условима ниских спољашњих температура. Овакав концепт омогућава значајне уштеде енергије и смањење

емисија, уз минималне интервенције на унутрашњим инсталацијама и без угрожавања поузданости система.



Слика 7: Концепт хибридног система са топлотном пумпом ваздух-вода за вишепородичну стамбену зграду.

4.1.4 Претпоставке за моделовање топлотних пумпи

При динамичкој симулацији топлотних пумпи у IESVE усвојене су следеће претпоставке:

- Капацитет и коефицијент перформанси (COP) топлотне пумпе моделовани су као функција спољашње температуре ваздуха.
- За породичне куће, топлотна пумпа покрива 100 % годишњих потреба за грејањем простора и припремом санитарне топле воде.
- За вишепородичне зграде, топлотна пумпа покрива приближно 50–65 % годишње потребе за грејањем.
- Укључена је потрошња електричне енергије помоћних уређаја (циркулационе пумпе, систем управљања).
- Губици услед одлеђивања обухваћени су индиректно кроз смањење вредности COP-а при ниским спољашњим температурама.

Перформансе топлотне пумпе ваздух-вода моделоване су у софтверском пакету применом биквадратне функције која описује зависност коефицијента перформанси (COP) од температуре спољашњег ваздуха и температуре воде на страни потрошача:

$$fCOP_{tt}(T_{elt}, T_{odb}) = \frac{C_{00} + C_{10}t_{elt} + C_{20}t_{elt}^2 + C_{00}t_{odb} + C_{02}t_{odb}^2 + C_{11}t_{elt}t_{odb}}{C_{norm}}$$

Где је:

$$t_{elt} = T_{elt} - T_{datum}$$

$$t_{odb} = T_{odb} - T_{datum}$$

T_{elt} температура воде на страни потрошача

T_{odb} температура сувог термометра спољашњег ваздуха

T_{datum} референтна (датумска) температура

C_{norm} нормализациона константа, дефинисана тако да је $fCOP_{tt}(T_{eltref}, T_{odbref})=1$ у референтним условима.

Референтни услови усвојени у моделу су: $COP_{href}=2.3$ °C, $T_{odbhref}=4$ °C, and $T_{elthref}=40$ °C, при чему је максимална вредност COP-а ограничена на 4.

Овај тип биквадратне функције представља стандардни приступ у моделовању перформанси HVAC система и широко се примењује у софтверима за динамичку симулацију енергетских перформанси зграда, као што су IES VE и EnergyPlus, ради реалистичног описивања утицаја радних услова на ефикасност топлотних пумпи.

4.2 Соларни термални системи за припрему санитарне топле воде

4.2.1 Опис мере и принцип рада

Соларни термални системи користе сунчево зрачење за производњу топлотне енергије која се користи за припрему санитарне топле воде. Систем се састоји од соларних колектора, цевне мреже, акумулационог бојлера и помоћног извора топлоте.

Ова мера је посебно погодна за породичне куће, где постоји довољна кровна површина за уградњу колектора и релативно једноставна интеграција у постојеће системе.



Вакуумски соларни колектори



Равни соларни колектори

Слика 8: Соларни термални систем за припрему санитарне топле воде у породичној кући.

4.2.2 Примена и ограничења

У оквиру овог извештаја, соларни термални системи анализирани су искључиво за породичне куће. Системи су димензионисани тако да покрију значајан део годишње потрошње енергије за санитарну топлу воду, док се у периодима недовољне инсолације ослањају на помоћни извор топлоте.

Примена соларних термалних система није разматрана за вишепородичне стамбене зграде, пре свега због ограничене расположиве кровне површине по стамбеној јединици и повећане сложености пројектовања и одржавања система.

4.2.3 Претпоставке за моделовање соларних термалних система

При симулацији соларних термалних система усвојене су следеће претпоставке:

- Соларни термални системи моделовани су искључиво за припрему санитарне топле воде.
- У обзир су узети положај сунца, облачност и интензитет сунчевог зрачења.
- Годишњи соларни удео за санитарну топлу воду износи приближно 60–70 %.
- Ефикасност колектора моделована је кроз поједностављену ефикасностну криву.
- Губици у акумулационом бојлеру су укључени у прорачун.

4.3 Фотонапонски системи за производњу електричне енергије

4.3.1 Опис мере и принцип рада

Фотонапонски системи производе електричну енергију директном конверзијом сунчевог зрачења у електричну енергију. У стамбеним објектима, ови системи се најчешће постављају на кровове и повезују са електроенергетском мрежом.

Фотонапонски системи су посебно погодни за комбинацију са електрично погоњеним системима, као што су топлотне пумпе, јер омогућавају смањење нето потрошње електричне енергије из мреже.



Слика 9: Фотонапонски систем на крову породичне куће.

4.3.2 Примена и ограничења

Фотонапонски системи анализирани су искључиво за породичне куће. Инсталисана снага система ограничена је расположивом кровном површином и креће се у распону од 5 kW до 10 kW.

За вишепородичне стамбене зграде, примена фотонапонских система није разматрана у оквиру овог извештаја, због ограничења везаних за кровну површину, власничку структуру и расподелу произведене електричне енергије.

4.3.3 Претпоставке за моделовање фотонапонских система

При симулацији фотонапонских система усвојене су следеће претпоставке:

- Производња електричне енергије израчунава се на основу типичне метеоролошке године.
- Укључени су системски губици (инвертер, ожичење, засенчење).
- Претпостављена је приоритетна сопствена потрошња произведене електричне енергије.
- Електрично складиштење енергије није укључено у анализу.

5 Резултати динамичких симулација

5.1 Породична кућа – 120 m²

За породичну кућу површине 120 m², претпостављено је да је термички омотач зграде претходно унапређен до енергетског разреда C, што одговара специфичној потреби за грејањем од приближно 75 kWh/m²·год. На тој основи је дефинисана годишња потреба за енергијом за грејање од око 9 000 kWh.

Топлотна пумпа ваздух–вода је димензионисана за покривање целокупнеог топлотног оптерећења при спољашњој температури од 2°C, док се при нижим температурама, по потреби, пали помоћни електрични грејач. У симулацији је узета у обзир варијација ефикасности топлотне пумпе у функцији спољне температуре ваздуха, што омогућава реалистичну процену њене годишње потрошње електричне енергије.

Соларни термални систем је димензионисан као типичан систем за припрему санитарне топле воде у домаћинству од четири члана, са површином соларних колектора од приближно 4–5 m² и акумулационим бојлером запремине око 200–250 литара. У динамичкој симулацији у IESVE, овај систем обезбеђује приближно 60 % годишње потребе за енергијом за санитарну топлу воду, док се преостали део покрива електричним догревањем.

Фотонапонски систем је димензионисан на инсталисану снагу од око 6 kWp, у складу са расположивом кровном површином и карактеристичним вредностима из пројектне презентације. Производња електричне енергије из PV система добијена је кроз IESVE симулацију за типичну метеоролошку годину за Београд и износи приближно 7 200 kWh годишње.

Табела 5-1: Финална енергија за грејање – породична кућа 120 m² [kWh]

Мера / сценарио	Грејање – потрошња финалне енергије [kWh/год]	СТВ – потрошња енергије [kWh/год]	Производња електричне енергије [kWh/год]
	[kWh]	[kWh/m ²]	[kWh]
Референтно стање	28.024	234	3 600
Доведено на разред „С“	7.755	64	3 600
Топлотна пумпа	2.769	23	3 600
Соларни термал (СТВ, соларни удео ≈ 60 %)			1 400
Фотонапонски систем (≈ 6 kWp)			3 600
Хибрид (ТП + СТ)			1 400
Хибрид (ТП + PV)			3 600

5.2 Породична кућа – 200 m²

За породичну кућу површине 200 m² примењен је идентичан методолошки приступ, уз претпоставку да је објекат након санације термичког омотача доведен до енергетског разреда С. То одговара годишњој потреби за енергијом за грејање од приближно 15 000 kWh.

Топлотна пумпа ваздух–вода је димензионисана за покривање целокупнеог топлотног оптерећења при спољашњој температури од 2°C, док се при нижим температурама, по потреби, пали помоћни електрични грејач. У симулацији је узета у обзир варијација ефикасности топлотне пумпе у функцији спољне температуре ваздуха, што омогућава реалистичну процену њене годишње потрошње електричне енергије.

Соларни термални систем је димензионисан са већом површином колектора, приближно 5–6 m², и акумулационим резервоаром од око 300 литара, како би одговарао потребама четворочланог домаћинства у већем објекту. Као и код мање куће, у симулацији је усвојен соларни удео од око 60 % у покривању годишње потребе за енергијом за санитарну топлу воду.

Фотонапонски систем је димензионисан на приближно 8 kWp инсталисане снаге, што одговара већој расположивој кровној површини. Годишња производња електричне енергије, добијена симулацијом у IESVE за типичну метеоролошку годину за Београд, износи приближно 9 600 kWh

Табела 5-2: Финална енергија за грејање – породична кућа 200 m² [kWh]

Мера / сценарио	Грејање – потрошња финалне енергије [kWh/год]	СТВ – потрошња енергије [kWh/год]	Производња електричне енергије [kWh/год]
	[kWh]	[kWh/m ²]	[kWh]
Референтно стање	45.092	234	3.600
Доведено на разред „С“	12.240	61	3.600
Топлотна пумпа	4.371	22	3.600
Соларни термал (СТВ, соларни удео ≈ 60 %)			1.400
Фотонапонски систем (≈ 6 kWp)			3.600
Хибрид (ТП + СТ)	4.371	22	1.400
Хибрид (ТП + PV)	4.371	22	3.600

5.3 Двопородична кућа

Двопородичне куће представља репрезентативан пример постојећег стамбеног објекта са два одвојена стамбена јединична простора, какав је чест у урбаним и приградским зонама. У оквиру овог извештаја, овај објект се не посматра као конкретна кућа преузета из катастра или са терена, већ као теоријски модел који је заснован на реалним геометријским, конструктивним и експлоатационим карактеристикама постојећег стамбеног фонда, што омогућава лако преношење добијених резултата у праксу.

У складу са методологијом примењеном и код осталих једнопородичних објеката, претпостављено је да је термички омотач двопородичне куће претходно унапређен до најмање енергетског разреда С.

Топлотна пумпа ваздух–вода је димензионисана тако да покрива целокупну прорачунску потребу за грејањем објекта након санације омотача.

Соларни термални систем је димензионисан као типичан систем за припрему санитарне топле воде за два домаћинства, са укупно већом површином соларних колектора (приближно 6–8 m²) и одговарајућим акумулационим капацитетом. У динамичкој симулацији у IESVE претпостављено је да соларни термални систем покрива око 60 % укупне годишње потребе за енергијом за санитарну топлу воду, док се преостали део обезбеђује електричним догревањем.

Фотонапонски систем је димензионисан у складу са већом расположивом кровном површином двопородичне куће, са инсталисаном снагом од приближно 9–10 kWp. Годишња производња електричне енергије добијена је кроз динамичку симулацију у IESVE за типичну метеоролошку годину за подручје Београда и представља укупни енергетски допринос система, без везивања за конкретну намену потрошње.

Табела 5-3: Финална енергија за грејање – породична кућа WP4 архетип (280 m²) [kWh]

Мера / сценарио	Грејање – потрошња финалне енергије	СТВ – потрошња енергије	Производња електричне енергије
	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Референтно стање	38.551		
Доведено на разред „С“	9.586	3 600	0
Топлотна пумпа	3.424	3 600	0
Соларни термал (СТВ, соларни удео ≈ 60 %)		1 400	0
Фотонапонски систем (≈ 8 kWp)		3 600	9 600
Хибрид (ТП + СТ)		1 400	0
Хибрид (ТП + PV)		3 600	9 600

5.4 Стамбене зграде

Табела 5-4: Финална енергија за грејање – солитер [kWh]

Сценарио	Солитер	Ламела
	[kWh]	[kWh]
Референтно стање (без унапређења омотача)	462,040	638,602
Унапређење омотача	189,436	332,073
Омотач + топлотна пумпа	130,563	204,795 ¹

¹ Под претпоставком да је топлотна пумпа димензионисана тако да покрива целокупне потребе за топлотном енергијом при спољашњим температурама изнад 4 °C, док на нижим температурама потребе за грејањем покрива систем даљинског грејања.

5.5 Објашњење мера за вишепородичне стамбене зграде (солитери и ламеле)

5.5.1 Енергетска санација термичког омотача

Енергетска санација термичког омотача вишепородичних стамбених зграда обухвата мере дефинисане у референтном научном раду који је коришћен у оквиру овог пројекта. Ове мере укључују додатну топлотну изолацију спољних зидова, унапређење термичких карактеристика крова и међуспратних конструкција, као и замену или унапређење постојеће столарије. Циљ ових интервенција је смањење специфичних топлотних губитака зграде и укупне потребе за енергијом за грејање, без промене функционалне намене или габарита објекта.

У анализи је претпостављено да мере санације омотача доводе до смањења финалне енергије за грејање реда величине 20 % у односу на изворно стање, што је у складу са резултатима приказаним у наведеном раду.

5.5.2 Топлотна пумпа за вишепородичне зграде

За солитере и ламеле разматрана је примена топлотних пумпи као централних хибридних система за грејање, који раде паралелно са постојећим системом (нпр. даљинско грејање или централни котао). Топлотна пумпа је димензионисана тако да покрива базно оптерећење за грејање током већег дела грејне сезоне, док се постојећи систем користи за покривање вршних оптерећења при ниским спољним температурама.

У симулацији је претпостављено да топлотна пумпа покрива приближно 50–65 % годишње потребе за енергијом за грејање, у зависности од типа зграде, што је у складу са резултатима из референтног рада. Рад топлотне пумпе моделован је у IESVE као функција спољне температуре ваздуха, са одговарајућом регулационом стратегијом која даје приоритет њеном раду у условима умерених спољних температура, где је ефикасност највећа.

6 Дискусија резултата

6.1 Општа запажања и методолошки контекст

Резултати приказани у Поглављу 5 потврђују да ефекти мера заснованих на обновљивим изворима енергије у великој мери зависе од почетног енергетског стања зграде, као и од редоследа њихове примене. Посебно је важно нагласити да су за једнопородичне и двопородичне куће све анализе спроведене под претпоставком да је термички омотач претходно унапређен до најмање енергетског разреда C, што представља неопходан предуслов за ефикасну и рационалну примену напредних система као што су топлотне пумпе.

Овај приступ је у складу са принципом „fabric first“, који подразумева да се прво смањују топлотни губици зграде, а тек потом оптимизују технички системи. У том контексту, резултати овог извештаја не треба да се тумаче као алтернатива санацији омотача, већ као процена додатних уштеда које се могу остварити након што је зграда доведена на прихватљив ниво енергетских перформанси.

6.2 Једнопородичне и двопородичне куће

6.2.1 Ефекти топлотних пумпи на енергију за грејање

Код свих анализираних једнопородичних објеката, примена топлотних пумпи ваздух–вода доводи до значајног смањења финалне енергије потребне за грејање. Уз усвојени конзервативни сезонски коефицијент перформанси ($COP \approx 2,5$ до 3), потрошња финалне енергије за грејање смањује се приближно за 60 % у односу на референтно стање након санације омотача.

Ови резултати су у складу са очекивањима за објекте са специфичном потребом за грејањем од око 75 kWh/m²-год и потврђују да топлотне пумпе представљају једну од најефикаснијих појединачних мера за декарбонизацију грејања у породичним кућама, под условом да су испуњени основни технички предуслови.

6.2.2 Улога соларних термалних система

Соларни термални системи, како је јасно приказано у табелама резултата, немају директан утицај на енергију за грејање простора. Њихов допринос се огледа искључиво у смањењу енергије потребне за припрему санитарне топле воде.

Иако ова уштеда не утиче на билансе грејања, она може имати значајан укупни енергетски ефекат на нивоу домаћинства, посебно у објектима са већим бројем корисника. У комбинацији са топлотним пумпама, соларни термални системи доприносе смањењу укупне потрошње електричне енергије за рад система за припрему топле воде.

6.2.3 Фотонапонски системи и електрична енергија

Фотонапонски системи не утичу директно на потребе за топлотном енергијом, али њихова улога у смањењу нето потрошње електричне енергије је значајна. Производња електричне енергије из

PV система може делимично или у потпуности покрити потрошњу електричне енергије топлотне пумпе, као и других електричних потрошача у домаћинству.

Важно је нагласити да у оквиру ове анализе произведена електрична енергија није везивана за конкретну намену, већ је посматрана као укупни енергетски допринос. Овакав приступ омогућава реалистичну процену потенцијала фотонапонских система без увођења додатних претпоставки о режимима потрошње и складиштењу енергије.

6.2.4 Хибридна решења

Комбиновањем топлотних пумпи са соларним термалним или фотонапонским системима постижу се најбољи укупни енергетски резултати. Хибридна решења омогућавају истовремено смањење енергије за грејање и других енергетских токова (електрична енергија и/или енергија за санитарну топлу воду), што их чини посебно атрактивним у контексту дугорочне енергетске транзиције домаћинства.

При томе је важно нагласити да у оквиру једног хибридног решења није разматрана истовремена примена соларног термалног и фотонапонског система, већ је у сваком случају изабрана једна од ове две технологије у комбинацији са топлотном пумпом.

6.3 Вишепородичне стамбене зграде

За вишепородичне стамбене зграде (солитере и ламеле) примењен је другачији аналитички приступ, који одражава реалне услове у пракси. Резултати показују да појединачне мере, као што су санација термичког омотача или увођење топлотних пумпи као хибридних система, доносе умерене уштеде енергије, реда величине 20–25 %.

Највеће уштеде постижу се комбиновањем ових мера, при чему укупно смањење финалне енергије за грејање достиже приближно 45 % у односу на референтно стање. Ови резултати су у складу са налазима претходно објављених студија и потврђују да је фазни приступ – санација омотача у комбинацији са делимичном електрификацијом система грејања – један од најреалистичнијих путева декарбонизације вишепородичног стамбеног фонда.

6.4 Импликације за FF GreEN оквир

Резултати анализе јасно указују да не постоји једно универзално решење које је подједнако применљиво на све типове зграда. За породичне куће, предуслов успешне примене обновљивих извора енергије је санација термичког омотача, након чега топлотне пумпе и хибридна решења пружају највеће уштеде. За вишепородичне зграде, комбинација мера и фазна имплементација представљају реалистичнији приступ.

Ови налази могу послужити као основа за дефинисање препорука и сценарија у оквиру FF GreEN оквира, уз јасно разликовање стратегија за различите типове стамбених објеката.

7 Закључци

У овом извештају извршена је детаљна анализа енергетских ефеката појединачних мера и хибридних решења заснованих на обновљивим изворима енергије за различите типове стамбених објеката. Анализа је спроведена применом динамичке симулације у софтверском окружењу IES Virtual Environment (IESVE), уз коришћење референтних сценарија дефинисаних у оквиру WP4 – D4.1 извештаја.

За једнопородичне и двопородичне куће усвојен је приступ који подразумева да је санација термичког омотача до најмање енергетског разреда C предуслов за даљу примену система заснованих на обновљивим изворима енергије. Под овом претпоставком, резултати показују да топлотне пумпе ваздух–вода представљају најефикаснију појединачну меру за смањење финалне енергије за грејање, док соларни термални и фотонапонски системи доприносе смањењу других енергетских токова у објекту.

За вишепородичне стамбене зграде анализирани су сценарији који одражавају фазну имплементацију мера, укључујући санацију термичког омотача и примену топлотних пумпи као хибридних система. Резултати указују да се највеће уштеде енергије за грејање постижу комбинацијом ових мера, док појединачне интервенције доносе умереније, али и даље значајне ефекте.

Резултати овог извештаја пружају квантификовану основу за разумевање енергетских ефеката обновљивих технологија у стамбеном сектору и представљају неопходан улаз за даље анализе. У наредној фази пројекта, ови резултати ће бити коришћени као основа за спровођење анализа животног циклуса (LCA), које ће омогућити оптимизацију мера у односу на економске и дугорочне развојне критеријуме. Ови резултати могу послужити као основа за политике субвенција ОИЕ у Србији, узимајући у обзир трошкове имплементације (даљи рад у WP5).

8 Списак литературе

- [1] Jovanović P.M., Ignjatović, D., Radivojević, A., Rajčić, A., Đukanović Lj., Nedić, M., *Atlas of Family Housing in Serbia*, Fac. Archit. Univ. Belgrade GIZ–German Assoc. Int. Coop., Belgrade, 2012
- [2] Jovanović P.M., Ignjatović, D., Radivojević, A., Rajčić, A., Đukanović Lj., Nedić, M., *National Typology of Residential Buildings in Serbia*, Fac. Archit. Univ. Belgrade GIZ–German Assoc. Int. Coop., Belgrade, 2013
- [3] Васиљевић, П., Игњатовић, Д., Ђуковић Игњатовић, Н., Васиљевић, Н., Дамњановић, В., Енергетска мапа Новог Београда, GIZ–German Assoc. Int. Coop., Belgrade, 2016
- [4] Центар за становање ИМС. Фототека станова: Колекција 1980, тема: Нови Београд. Технички уредник Арх. Вукица Ђорђевић, 1980.