УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

ЗБОРНИК РАДОВА
ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Едиција: Техничке науке – зборници
Година: XLI
Број: 7/2026

Нови Сад

Едиција: „Техничке науке – Зборници“
Година: XLI Свеска: 7
Издавач: Факултет техничких наука Нови Сад

Главни и одговорни уредник Едиције: проф. др Борис Думнић, декан Факултета техничких наука у Новом Саду

Уређивачки одбор

Проф. др Марко Векић, главни уредник

Сара Копривица, заменик главног уредника

Штампање одобрио: Савет за библиотечку и издавачку делатност ФТН, председник, проф. др Селена Самарџић Цвијановић

Штампа: ФТН – Графички центар ГРИД, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад

CIP-Каталогизација у публикацији
Библиотека Матице српске, Нови Сад

378.9(497.113)(082)
62

ЗБОРНИК радова Факултета техничких наука / главни и одговорни уредник
Борис Думнић. – Год. 7, бр. 9 (1974)-1990/1991, бр.21/22 ; Год. 23, бр 1 (2008)-. – Нови Сад : Факултет техничких наука, 1974-1991; 2008-. – илустр. ; 30 цм. – (Едиција: Техничке науке – зборници)

Месечно

ISSN 0350-428X

COBISS.SR-ID 58627591

ОБЛАСТИ (СТУДИЈСКИ ПРОГРАМИ)

У свесци са редним бројем 7 објављени су радови из следећих области (студијских програма):

- **Инжењерство заштите животне средине**
- **Мехатроника**
- **Геодезија и геоинформатика**
- **Инжењерство третмана и заштите вода**
- **Инжењерство информационих система**
- **Биомедицинско инжењерство**
- **Чисте енергетске технологије**

ПРЕДГОВОР

Поштовани читаоци,

Пред вама је седма овогодишња свеска часописа „Зборник радова Факултета техничких наука".

Часопис је покренут давне 1960. године, одмах по оснивању Машинског факултета у Новом Саду, као „Зборник радова Машинског факултета", а први број је одштампан 1965. године. Након осам публикованих бројева у шест година, пратећи прерастање Машинског факултета у Факултет техничких наука, часопис мења назив у „Зборник радова Факултета техничких наука" и 1974. године излази као број 9 (VII година). У том периоду у часопису се објављују научни и стручни радови, резултати истраживања професора, сарадника и студената ФТН-а, али и аутора ван ФТН-а, тако да часопис постаје значајно место презентације најновијих научних резултата и достигнућа. Од броја 17 (1986. год.), часопис почиње да излази искључиво на енглеском језику и добија поднаслов *Publications of the School of Engineering.*

Наставно-научно веће ФТН-а је одлучило да од новембра 2008. год. у облику пилот пројекта, а од фебруара 2009. год. као сталну активност, уведе презентацију најважнијих резултата свих мастер радова студената ФТН-а у облику кратког рада у „Зборнику радова Факултета техничких наука".

Поред студената мастер студија, часопис је отворен и за студенте докторских студија, као и за прилоге аутора са Факултета техничких наука, али и ван ФТН-а.

Зборник излази у два облика – електронском на веб-страници Факултета техничких наука (www.ftn.uns.ac.rs) и штампаном, који је пред вама. Обе верзије публикују се сваки месец, у оквиру промоције дипломираних мастера.

Известан број кандидата објавили су радове на некој од домаћих научних конференција или у неком од часописа. Њихови радови нису штампани у Зборнику радова ФТН-а.

Континуираним радом и унапређењем квалитета часописа, план је да часопис постане препознатљив међу ауторима, чиме ће значајно допринети да се оствари мото Факултета техничких наука:

„Високо место у друштву најбољих“

Уредништво

Садржај

ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

Милена Бореновић, Маја Петровић 771-775

КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА ЕКОЛОШКЕ ОДРЖИВОСТИ ДЕРМОКОЗМЕТИЧКИХ БРЕНДОВА ДОСТУПНИХ НА ТРЖИШТУ РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ

МЕХАТРОНИКА

Момир Ћирковић 776-781

РЕГУЛАЦИЈА СИЛЕ ПРИ ХВАТАЊУ ОБЈЕКАТА РАЗЛИЧИТИХ КАРАКТЕРИСТИКА ПОМОЋУ ФЛЕКСИБИЛНЕ РОБОТСКЕ ХВАТАЉКЕ

Марко Манчев 782-786

РАЗВОЈ МОДУЛА ЗА НАВИГАЦИЈУ МОБИЛНЕ ПЛАТФОРМЕ ЗАСНОВАНОГ НА RASPBERRY PI МИКРОРАЧУНАРУ И ФУЗИЈЕ СЕНЗОРА

Флориан Шандор, Гордана Остојић 787-790

ИОТ СИСТЕМ ЗА НАДЗОР КОШНИЦЕ

ГЕОДЕЗИЈА И ГЕОИНФОРМАТИКА

Емилија Ристић 791-794

ЕКСТРАКЦИЈА ГЕОМЕТРИЈЕ КРОВОВА ОБЈЕКАТА НА ОСНОВУ ОБЛАКА ТАЧАКА ДОБИЈЕНОГ ПРИМЕНОМ UAV ФОТОГРАМЕТРИЈЕ

Ченге Михаљи 795-799

ИДЕНТИФИКАЦИЈА ГРУБИХ ГРЕШАКА У ГЕОДЕТСКИМ МЕРЕЊИМА ПРИМЕНОМ РАЗЛИЧИТИХ МЕТОДА

Михајло Митровић 800-803

ВИЗУАЛИЗАЦИЈА ГЕОПРОСТОРНИХ И СТАТИСТИЧКИХ ПОДАТАКА КОРИШЋЕЊЕМ ПРОГРАМСКОГ ЈЕЗИКА R

ИНЖЕЊЕРСТВО ТРЕТМАНА И ЗАШТИТЕ ВОДА

Никола Глуваковић, Маја Турк Секулић 804-807

КОМПАРАЦИЈА ФИЗИЧКО-ХЕМИЈСКИХ ПАРАМЕТАРА РЕКЕ ДУНАВ У НЕМАЧКОЈ, АУСТРИЈИ, МАЂАРСКОЈ И СРБИЈИ

ИНЖЕЊЕРСТВО ИНФОРМАЦИОНИХ СИСТЕМА

Андреја Вуковић 808-811

РАЗВОЈ И ПРИМЈЕНА РЕВИТ ДОДАТКА ЗА АУТОМАТИЗАЦИЈУ БИМ ПРОЦЕСА ПОМОЋУ ПРОГРАМСКОГ ЈЕЗИКА C#

Ирена Ијачић 812-815

ЕМПИРИЈСКА АНАЛИЗА ЕФИКАСНОСТИ СТАТИЧКЕ АНАЛИЗЕ И АИ МОДЕЛА У ДЕТЕКЦИЈИ ПЛАГИЈАТА ПРОГРАМСКОГ КОДА

Давид Фејеш 816-820
УПОТРЕБА ВЕЛИКИХ ЈЕЗИЧКИХ МОДЕЛА У ТЕСТИРАЊУ СОФТВЕРА

Валентина Андрић 821-824
УПОРЕДНА АНАЛИЗА МИКРОСЕРВИСНЕ И SERVERLESS АРХИТЕКТУРЕ У ДИЗАЈНУ ДИСТРИБУИРАНИХ СИСТЕМА

БИОМЕДИЦИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

Мила Пробојчевић 825-828
АНАЛИЗА И ПРОРАЧУН ПАРАМЕТАРА РАДИОХИРУРШКОГ СИСТЕМА

Адријана Сокнић 829-832
МАПИРАЊЕ МОЗГА: ТЕХНИКЕ И ПРИМЕНА

ЧИСТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Николета Мишура, Золтан Чорба 833-836
ОДРЖАВАЊЕ КРОВНИХ ФОТОНАПОНСКИХ ЕЛЕКТРАНА

Ксенија Лазић, Игор Мујан 837-841
АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИЈА ВРФ СИСТЕМА У СТАМБЕНОМ ОБЈЕКТУ ПОМОЋУ СОФТВЕРСКОГ АЛАТА BOSCH AIRSELECT

Маријана Цвијић 842-845
ПОРЕЂЕЊЕ СОФТВЕРСКИХ РЕШЕЊА ЗА АНАЛИЗУ НОСЕЋЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ФОТОНАПОНСКИХ ЕЛЕКТРАНА

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 502/504
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35HZ01Borenovic

Компаративна анализа еколошке одрживости дермокозметичких брендова доступних на тржишту Републике Србије

Comparative Analysis of Ecological Sustainability of Dermocosmetic Brands Available on the Market of the Republic of Serbia

Милена Бореновић, Маја Петровић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

Кратак садржај – *Рад истражује еколошку одрживост дермокозметичких производа, са посебним фокусом на процену пракси одрживости брендова и перцепцију потрошача у том контексту. Анализа обухвата савремене трендове и изазове одрживости у козметичкој индустрији, утицај потрошачких навика, као и одрживост животног циклуса производа, укључујући формулацију, производњу, паковање и дистрибуцију. Истраживање пружа увид у постојеће еколошке активности брендова и очекивања потрошача, истичући потенцијалне смернице за унапређење одрживости у дермокозметичком сектору и подстицање циркуларних модела управљања ресурсима.*

Кључне речи: *дермокозметика, еколошка одрживост, животни циклус производа, стандарди одрживости.*

Abstract – *The paper explores the ecological sustainability of dermocosmetic products, with a particular focus on assessing brand sustainability practices and consumer perceptions in this context. The analysis addresses contemporary trends and challenges of sustainability in the cosmetics industry, the influence of consumer habits, and the sustainability of the product life cycle, including formulation, production, packaging, and distribution. The research provides insight into existing environmental initiatives of dermocosmetic brands and consumer expectations, highlighting potential directions for enhancing sustainability and promoting circular resource management within the dermocosmetic sector.*

Keywords: *dermocosmetics, ecological sustainability, product life cycle, sustainability standards*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Маја Петровић, ванр. проф.

1. УВОД

Дермокозметика представља динамично растући сегмент савремене козметичке индустрије, усмерен на очување здравља и функције коже кроз спој дерматолошких и козметичких својстава. Са порастом свакодневне употребе ових производа, њихов утицај на животну средину постаје све значајнија тема у научним и индустријским круговима. Глобални трендови одрживог развоја и еколошке одговорности истичу потребу за систематском проценом животног циклуса производа, при чему амбалажа има кључну улогу као један од највећих извора отпада у козметичком сектору [1].

Индустрија лепоте суочава се са бројним еколошким и друштвеним изазовима, укључујући високу потрошњу природних ресурса, емисије гасова са ефектом стаклене баште и стварање постпотрошачког отпада [2, 3]. Прелазак ка зеленој транзицији и примена одрживих пракси у формулацији, производњи и дизајну амбалаже представљају кључне механизме за смањење негативног утицаја на животну средину, уз истовремено задовољење очекивања све еколошки свеснијих потрошача.

Процена животног циклуса амбалаже (енг. *Life Cycle Assessment,* LCA) омогућава свеобухватну евалуацију потрошње ресурса, енергетских захтева, емисија и могућности рециклаже материјала, у складу са међународним стандардима ISO 14040 и ISO 14044. Тржиште дермокозметике у Републици Србији је у експанзији, али су подаци о еколошким аспектима амбалаже ограничени, што наглашава потребу за истраживањем примене одрживих материјала, система означавања, циркуларних модела управљања отпадом и мера за смањење негативног утицаја на животну средину.

Циљ дипломског мастер рада је спровођење компаративне анализе еколошке одрживости дермокозметичких производа доступних на тржишту Републике Србије, са посебним фокусом на примену принципа одрживости, избор материјала и утицај на перцепцију потрошача. Добијени резултати допринеће бољем разумевању еколошких пракси у сектору дермокозметике, подстицању циркуларног управљања

ресурсима и унапређењу информисаности и свести потрошача о одрживим производима.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

Одрживост представља кључни принцип савременог развоја, усмерен на задовољење потреба садашњих генерација без угрожавања капацитета будућих [4]. Глобални трендови, климатске промене и растућа друштвена одговорност намећу потребу за стратешким приступом одрживости, при чему предузећа играју централну улогу кроз управљање ресурсима и процесима производње [5].

Козметичка индустрија, као динамичан сегмент тржишта потрошачких производа, суочава се са бројним изазовима одрживог развоја, укључујући висок ниво потрошње ресурса, емисије гасова са ефектом стаклене баште и генерисање отпада, посебно у делу амбалаже [2, 3]. Одрживост у овом сектору подразумева интегрално управљање животним циклусом производа, које обухвата избор сировина, производњу, дистрибуцију, употребу и завршетак животног века амбалаже, уз примену циркуларних модела и еколошки одговорних пракси [6].

Имплементација принципа корпоративне друштвене одговорности (енг. *Corporate Social Responsibility*, CSR) и ESG индикатора омогућава транспарентно пословање и подстиче поверење потрошача [7, 8], док присуство *greenwashing*-а и даље представља значајан изазов [9]. Процена животног циклуса производа (енг. *Life Cycle Assessment*, LCA) постаје кључни алат за утврђивање еколошког утицаја и оптимизацију амбалаже [10, 11]. Одговорна набавка сировина, посебно контрола високо ризичних материјала као што су палмино уље или мика, доприноси очувању биодиверзитета и смањењу еколошког отиска [12].

На тржиштима у развоју, као што је Република Србија, подаци о примени одрживих пракси и перцепцији потрошача су ограничени [13], што наглашава потребу за емпиријским истраживањима. Разумевање интеракције између одрживих пракси и понашања потрошача представља предуслов за унапређење еколошких стандарда и позиционирање дермокозметичких брендова на тржишту.

2.1. Трендови и изазови

Савремени трендови у козметичкој индустрији указују на растућу потрошачку свест о еколошкој одрживости, што се огледа у интересовању за производе засноване на принципима *clean beauty, vegan, cruelty-free и zero-waste* [14]. Истовремено, све је већа примена сертификата и ознака као што су COSMOS Organic, Ecocert, Cradle to Cradle, FSC® и ISO 14021 [7].

Амбалажа, која чини до 70% укупног отпада козметичког сектора све више се развија у складу са принципима циркуларне економије кроз смањење употребе пластике, примену рециклираних и биоразградивих материјала и увођење *reuse* и *refill* система [6, 15]. Производња се унапређује применом обновљивих извора енергије, водно-ефикасних процеса и „*green chemistry*“ приступа [16].

Козметичка индустрија усмерава се ка *clean beauty*, vegan и *zero-waste* концептима, уз примену сертификата COSMOS, Ecocert и FSC® [7]. Кључни изазови су амбалажни отпад и *greenwashing*, што захтева LCA приступ и транспарентност [6].

2.2. Утицај потрошачких навика на еколошку одрживост

Потрошачке навике представљају кључни фактор еколошке трансформације козметичког тржишта [5]. Савремени потрошачи све више преферирају производе са одрживом амбалажом, *cruelty-free* праксама и нижим еколошким отиском, што подстиче компаније да усвајају енергетски ефикасне и одговорне технологије [17]. Сертификати као COSMOS, Ecocert, Vegan Society и FSC® повећавају транспарентност и поверење [18]. Ипак, у економијама у развоју, еколошке намере потрошача често остају неостварене због више цене и недовољног нивоа информисаности [13]. Животни циклус козметичког производа обухвата дизајн, избор сировина, производњу, паковање, транспорт, малопродају, употребу и фазу након употребе, при чему се већина еколошких перформанси „закључава“ у фази дизајна. Одрживи производ не значи само „природан“ или „органски“, већ интеграцију еколошких, друштвених и економских аспеката у све фазе циклуса [6]. Компаније примењују одговорну набавку сировина (RSPO, ABS, одрживи ланци за палмино уље, *shea* путер и сл.), зелену хемију, *upcycling* и развој алтернативних састојака, уз контролу токсиколошког и еколошког профила [12].

2.3. Одрживост животног циклуса козметичких производа

Животни циклус козметичког производа обухвата дизајн, избор састојака, производњу, паковање, транспорт, употребу и фазу након употребе, при чему је дизајн пресудан за укупан еколошки учинак. Појмови „природно“ или „органско“ не подразумевају нужно „одрживо“ [19, 20]. Одрживост интегрише еколошке, друштвене и економске аспекте током целог циклуса [6]. Велики брендови попут L'Oréal примењују принципе циркуларне економије, док мањи уводе иновације попут *waterless* формула и *upcycle*. Састојци као што су емолијенти, сурфактанти, конзерванси, боје, мириси и UV филтери све више се замењују биоразградивим и нетоксичним алтернативама, уз контролу стабилности и безбедности производа.

2.4. Вода као састојак

Вода је један од најважнијих састојака у козметичким производима, али и ограничен природни ресурс [21]. Концепт „*waterless beauty*“, развијен у Јужној Кореји 2015. године, има за циљ смањење употребе воде у производњи и дистрибуцији [22]. Нове *BYO Water* формулације омогућавају рехидратацију код куће, чиме се значајно смањује водни и енергетски отисак. Примери су Forgo сапун у праху и Weleda чврсти гелови за туширање.

2.5. Одрживост у производној фази и дистрибуцији

Производња козметике регулисана је стандардом ISO 22716:2007, који подстиче добре производне праксе и повезује се са циљевима одрживог развоја УН [23]. Главни изазови су потрошња енергије и воде, управљање отпадом и емисије CO_2. Примена обновљивих извора енергије и рециклаже воде доприносе смањењу утицаја на животну средину.

У дистрибуцији, прелазак на нискоугљенични транспорт, возове, бродове и електрична возила представља приоритет [24, 25]. Употребна фаза има највећи утицај код производа за испирање (до 90% CO_2 емисија), што подстиче развој концентрованих и „брзо испирљивих“ формула [26].

Коришћење стакла, алуминијума и биоразградивих материјала (Weleda, Sulapac®, Shiseido) доприноси смањењу еколошког отиска [27, 28].

3. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ

Истраживање је усмерено на оцену еколошке одрживости дермокозметичких брендова и перцепције потрошача у Републици Србији, уз комбинацију секундарне анализе (подаци компанија и релевантна документација) и примарног емпиријског истраживања (анкета потрошача).

3.1. Анализа корпоративних пракси

Квалитативно-квантитативна анализа спроведена је на три групе актера у ланцу вредности козметичке индустрије:

- Глобални лидери - L’Oréal, Unilever, Estée Lauder, Procter & Gamble, Shiseido, LVMH, Beiersdorf, Kao, Coty, Johnson & Johnson, које колективно контролишу значајан део светског тржишта и дефинишу референтне стандарде у области одрживости.
- OEM/ODM произвођачи - Cosmax, KDC/One, Intercos, као кључни носиоци иновација у формулацијама, паковању и одрживим технолошким решењима.
- Малопродајни ланци, Ulta Beauty, Sephora, Douglas, Walgreens, Watsons, као актери који кроз асортиман, политику „зелених полица“ и комуникацију са потрошачима утичу на видљивост и позиционирање одрживих брендова.

Оцена пракси одрживости реализована је на основу јавно доступних података (извештаји о одрживости, нефинансијски извештаји, ESG индикатори, саопштења компанија) према четири критеријума:

- Кључна еколошка питања и активности – идентификација приоритетних области (климатске промене, потрошња воде, отпад, пластика, биодиверзитет) и усвојених мера.
- Циљеви и мерење учинка – присуство квантитативних циљева, индикатора, праћења напретка и независне верификације.
- Транспарентност извештавања – ниво доступности података, усклађеност са релевантним стандардима.
- Континуитет и верификација – доследност активности у трогодишњем периоду, присуство сертификата трећих страна и иницијатива у области одрживе амбалаже и циркуларних модела.

У оквиру овог оквира анализирани су одабрани брендови присутни на тржишту Републике Србије (нпр. Darphin, Weleda, Dr. Hauschka, Kiehl’s), са фокусом на климатску неутралност, изворе енергије, одговорну набавку сировина, типове амбалаже, системе рециклаже и транспарентност комуникације са потрошачима.

3.2. Анализа перцепције потрошача

Примарно истраживање спроведено је ради испитивања:

- нивоа информисаности потрошача о еколошкој одрживости дермокозметичких брендова,
- значаја еколошких аспеката у процесу куповине,
- повезаности између социодемографских обележја и перцепције одрживости.

Примењен је квантитативни, дескриптивно-експликативни приступ.

Истраживање је реализовано у првој половини 2024. године, путем онлајн упитника на пригодном узорку пунолетних потрошача у Републици Србији. Упитник је обухватао:

- демографске карактеристике (пол, узраст, образовање),
- учесталост и тип употребе дермокозметичких производа,
- ставове о еколошким аспектима (амбалажа, сертификати, cruelty-free, састав),
- спремност на плаћање више цене за еколошки одржив производ („green premium“).

Ставови су мерени седмостепеном Ликертовом скалом. Подаци су обрађени у програму *JASP*. Коришћене су:

- дескриптивна статистика (структура узорка, средње вредности, стандардне девијације),
- χ^2 тестови за анализу повезаности категоријалних променљивих,
- једнофакторска *ANOVA* и *Kruskal-Wallis* тестови за поређење група,
- *Pearson* и *Spearman* корелације за испитивање везе између ставова, информисаности и спремности на подршку одрживим производима.

Ниво статистичке значајности постављен је на $p < 0,05$.

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

4.1. Практике одрживости дермокозметичких брендова

Анализа корпоративних података указује да већина глобалних дермокозметичких брендова интегрише принципе ESG у своје стратегије, са нагласком на:

- смањење емисија CO_2 и климатску неутралност у оквиру сопствених операција,
- прелазак на обновљиве изворе енергије,

- унапређење еколошких перформанси амбалаже,
- увођење алата за процену животног циклуса и етикетирање утицаја производа.

Estée Lauder Companies и L'Oréal група издвајају се постављањем јасних, временски дефинисаних климатских циљева и коришћењем верификованих индикатора учинка. Weleda и Dr. Hauschka демонстрирају виши степен интеграције принципа биодинамичке пољопривреде, заштите биодиверзитета и транспарентних стандарда (нпр. NATRUE, Demeter), док Kiehl's спроводи програме рециклаже амбалаже и обележавања еколошког утицаја производа.

Истовремено, уочени су изазови у погледу:

- непотпуне квантитативне документације код појединих брендова,
- потенцијалног *greenwashing*-а у комуникацији појединих еколошких тврдњи,
- ограничене видљивости глобалних активности на локалном тржишту.

Добијени резултати указују да, иако постоји значајан напредак у формалном усвајању политика одрживости, неопходна су даља истраживања стварних ефеката тих мера у контексту тржишта Републике Србије.

4.2. Перцепција потрошача на тржишту Републике Србије

Резултати анкете показују следеће кључне налазе:

- Структура корисника: Жене чине доминантну групу корисника дермокозметичких производа, што кореспондира са њиховом већом укљученошћу у теме личне неге и праћења информација о саставу и одрживости производа.
- Старосне групе: Испитаници старији од 25 година у већој мери исказују интересовање за квалитет, безбедност и еколошке аспекте, док млађе групе чешће доносе одлуке под утицајем трендова и дигиталних медија.
- Образовање: Виши ниво образовања повезан је са већом информисаношћу о сертификатима, критичнијим односом према декларисаним еколошким тврдњама и већом спремношћу да се подрже брендови са доказивим одрживим праксама.
- Спремност на „*green premium*“: Значајан део испитаника је спреман да плати вишу цену за производе који су еколошки прихватљиви, под условом да постоји јасна и поуздана информација о њиховој одрживости. Истовремено, уочава се део потрошача који не препознаје све релевантне аспекте одрживости или сматра да су еколошки производи недовољно доступни или прескупи.
- Улога поверења: Поверење у бренд и у релевантност еколошких ознака показује се као пресудан фактор. Транспарентност у погледу састава, порекла сировина и решења за амбалажу значајно утиче на куповне одлуке.

У целини, добијени резултати потврђују да еколошка одрживост постаје све значајнији критеријум у процесу избора дермокозметичких производа на тржишту Републике Србије, посебно међу информисанијим и образованијим потрошачима. За дермокозметичке брендове то имплицира потребу за:

- конзистентним унапређењем еколошких перформанси производа и амбалаже,
- јасном, проверљивом и неманипулативном комуникацијом о одрживости,
- едукацијом потрошача о значењу сертификата, еколошких ознака и одговорног понашања након употребе.

5. ЗАКЉУЧАК

Спроведена анализа показала је да дермокозметички брендови присутни на тржишту Републике Србије у све већој мери интегришу принципе еколошке одрживости, нарочито у области амбалаже, енергетске ефикасности и одговорне набавке сировина. Ипак, уочени су недовољна транспарентност, неуједначен ниво извештавања и потенцијални ризици од *greenwashing*-а, што указује на потребу за јаснијим стандардима, квантитативним показатељима и независном верификацијом еколошких тврдњи.

Резултати истраживања перцепције потрошача указују да еколошка одрживост постаје значајан критеријум при избору дермокозметике, посебно међу образованијим и информисанијим потрошачима, уз постојање спремности да се плати „*green premium*“ када постоји поверење у бренд и ознаке. Истовремено, евидентан је јаз између декларисаних ставова и стварних навика, условљен недовољном информисаношћу и неповерењем у декларисање.

На основу добијених резултата, може се закључити да постоји јасан потенцијал за даљи развој одрживе дермокозметике у Србији, уз неопходност интензивније едукације потрошача, унапређења регулаторног оквира и јасније комуникације о еколошким аспектима производа.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] World Economic Forum. (2019). A new circular vision for electronics: Time for a global reboot. WEF Report.

[2] A. Belousov, A. Koryakin, and P. Smirnov, "Economic perspectives in sustainable ingredient substitution," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 26, pp. 580–590, 2021.

[3] M. Garetti and M. Taisch, "Sustainable manufacturing: Trends and research challenges," *Production Planning & Control*, vol. 23, no. 2–3, pp. 83–104, 2011. doi: 10.1080/09537287.2011.591619.

[4] B. Keeble, The Brundtland Report: Our Common Future and Its Legacy, Oxford University Press, 1988.

[5] V. Haller, A. Menrad, and M. Häring, "Sustainability in the cosmetics industry: A case study analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 276, pp. 123-142, 2020.

[6] M. Bom, R. Kleef, and A. Faergemann, "Circular economy approaches in cosmetic packaging design," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 21, pp. e00112, 2019.

[7] S. Jahn and R. Brühl, “Sustainability labels in the cosmetics industry: Consumer trust and CSR perception,” *Journal of Business Research*, vol. 108, pp. 316–324, 2019.

[8] R. Baratta, L. Rossi, and F. Vrontis, “ESG-driven innovation and brand trust in cosmetic markets,” *Sustainability*, vol. 15, no. 4, pp. 1751–1765, 2023.

[9] K. Bakerjian, “Greenwashing in the beauty industry: Challenges and consumer response,” *Journal of Environmental Communication*, vol. 16, no. 7, pp. 987–1001, 2022.

[10] ISO 14040:2006, Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework, International Organization for Standardization, Geneva, 2006.

[11] ISO 14044:2006, Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines, International Organization for Standardization, Geneva, 2006.

[12] G. Gatti, L. Carfagna, and P. Ferrari, “Responsible sourcing and biodiversity protection in cosmetic ingredients,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 138, pp. 199–210, 2018.

[13] Y. Oe and K. Yamaoka, “Consumer perception of sustainable cosmetics in developing markets,” *Asian Journal of Sustainability and Social Responsibility*, vol. 7, no. 2, pp. 56–71, 2022.

[14] A. Amberg and C. Fogarassy, “Clean beauty and consumer awareness in the EU cosmetics market,” *European Journal of Sustainable Development*, vol. 8, no. 3, pp. 45–58, 2019.

[15] A. Lewis, S. Vermeer, and K. Reed, “Sustainable packaging in the cosmetics industry,” *Packaging Technology and Science*, vol. 34, no. 5, pp. 267–283, 2021.

[16] C. Hwang and S. Choi, “Green chemistry innovations in cosmetic manufacturing,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 18, pp. 22567–22579, 2020.

[17] C. Nair and R. Pillai, “Eco-design and sustainable consumer behavior in cosmetics,” *Journal of Consumer Behaviour*, vol. 20, no. 6, pp. 1514–1530, 2021.

[18] L. Lee and M. Chen, “Transparency and eco-label credibility in the cosmetics industry,” *Sustainability*, vol. 11, no. 12, pp. 3411–3423, 2019.

[19] A. Belousov, J. Dölle, and M. Leiser, “Green surfactants and their biodegradability in personal care products,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 626, pp. 127–138, 2021.

[20] F. Chemat, M. Abert-Vian, and G. Cravotto, “Green extraction of natural products: Concept and principles,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 18, pp. 1–24, 2019.

[21] United Nations, Sustainable Development Goal 12: Responsible Consumption and Production, UN SDG Knowledge Platform, 2020.

[22] S. Radin, “Waterless beauty: The next frontier in sustainable cosmetics,” *Cosmetics & Toiletries Magazine*, vol. 135, no. 4, pp. 22–29, 2020.

[23] ISO 22716:2007, *Cosmetics — Good Manufacturing Practices (GMP) — Guidelines on Good Manufacturing Practices*, International Organization for Standardization, Geneva, 2007.

[24] Cosmetics Europe, *Sustainability and the Cosmetics Industry: 2022 Progress Report*, Brussels, 2022.

[25] L’Oréal Group, *L’Oréal for the Future — Sustainability Commitments 2030*, Corporate Report, Paris, 2022.

[26] Procter & Gamble, Environmental Sustainability 2030 Roadmap, Cincinnati, 2020.

[27] A. Cinelli, G. Di Giacomo, and P. Salvio, “Biodegradable and bio-based packaging in cosmetics,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 22, pp. e00145, 2019.

[28] R. Sahota, Sustainability: How the Cosmetics Industry Is Greening Up, John Wiley & Sons, Chichester, 2014.



Милена Бореновић рођена је у Новом Садуи 1998. године. Дипломски рад из области заштите животне средине одбранила је на Факултету техничких наука 2022. године.

Контакт:
milenaborenovicjb@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 7.52
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35IH02Cirkovic

Регулација силе при хватању објеката различитих карактеристика помоћу флексибилне роботске хватаљке

Grip Force Regulation in the Manipulation of Objects with Different Characteristic Using a Soft Robotic Gripper

Момир Ћирковић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – МЕХАТРОНИКА

Кратак садржај – *Рад се бави развојем и управљањем флексибилне пнеуматске хватаљке за рад са објектима различитих карактеристика. Изабрани су сензор силе, програмабилно логички контролер, пнеуматска хватаљка и остале компоненте система, које су приказане кроз електричну и пнеуматску шему. Сензори пружају повратну информацију за пропорционално-интегрално-диференцијални (PID) регулатор притиска, који остварује жељену силу хватања, а тестирањем је потврђена функционалност и применљивост система.*

Кључне речи: *индустријска аутоматизација, флексибилна пнеуматска хватаљка, регулација силе.*

Abstract – *The thesis focuses on the development and control of a soft pneumatic gripper for handling objects with different characteristics. Selected components include force sensors (FSR), a programmable logic controller, the pneumatic gripper itself, and other system elements, which are presented through electric and pneumatic schematics. The sensors provide feedback to the proportional-integral-derivative (PID) pressure regulator, which achieves the desired grip force, and testing confirmed the functionality and applicability of the system in industrial environments.*

Keywords: *industrial automation, soft pneumatic gripper, grip force regulation.*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Драгана Орос, ванр. проф.

1. УВОД

Индустријске машине и роботски системи данас чине основу савремене аутоматизације јер омогућавају да се велики број сложених производних процеса одвија брзо прецизно и поуздано. С обзиром на то да се намена индустријских машина и робота одређује специфичним задатком, пресудну улогу у његовој функционалности има одговарајући крајњи извршни елемент (енг. end-effector). End-effector је један од најважнијих елемената који одређује шта робот или машина заправо може да уради и он представља „алат“ који омогућава физичку интеракцију са околином или објектом од интереса. Код индустријског робота end-effector представља последњи сегмент у кинематском ланцу и веома важан подсистем за успешну примену робота. Он може бити једноставна механичка или флексибилна хватаљка, заваривачка глава, алат за брушење, сензор силе па чак и комплексан мултифункционални систем. Због тога се избор end-effectora сматра једним од најкритичнијих елемената роботике, јер од њихове функционалности зависе брзина, прецизност, флексибилност и безбедност целог производног процеса [1, 2].

End-effectore можемо поделити према њиховој функцији и намени у 5 група [2]:

- Манипулациони end-effector (хватачи),
- Алати,
- Мерни и контролни уређаји,
- Специјализовани end-effector,
- Мултифункционални и модуларни end-effector.

2. „МЕКИ“ END-EFECTOR

„Меки“ (енг. soft) end-effectori се могу сврстати и у манипулациону и у специјализовану групу end-effectora, у зависности од његове конструкције и намене. То су најчешће хватаљке направљене од флексибилних и високо прилагодљивих материјала попут силикона и еластомера. Флексибилне хватаљке се због својих еластичних особина „прилагођавају“ објектима различитих облика и димензија и тако омогућавају да се сила равномерно распореди по контактној површини.

Пнеуматске флексибилне хватаљке се најчешће заснивају на конфигурацији са пнеуматским коморама. Пуњењем ових комора, долази до контролисаног савијања и ширења меких делова хватаљке, што јој омогућава да се природно прилагоди објекту који се хвата. Због мекоће материјала и њихове способности да апсорбују мање неправилности у положају, ове хватаљке добро подносе одступања у позиционирању и не захтевају прецизно позиционирање у односу на објекат. Захваљујући овим карактеристикама, флексибилне хватаљке налазе примену у прехрамбеној индустрији, биомедицинским и лабораторијским процесима, системима за паковање и сортирање, системима где је неопходна сигурна и прилагодљива

интеракција са предметима различитих димензија и механичких својстава. Ови системи одликују се високим степеном флексибилности, добром безбедношћу и брзим временом реакције. Њихова висока прилагодљивост чини их изузетно погодним решењем у апликацијама где класична, чврста хватаљка није довољно поуздана [3].

Флексибилне хватаљке са сензорима силе, које ћемо користити у нашем пројекту, представљају комбиновани (хибридни) end-efector који припада манипулационој групи, али поседује карактеристике мерних и сензорских end-efectora.

3. ЗАДАТАК И ИЗБОР КОМПОНЕНТИ

Овај пројекат служи како би се већ постојећи системи флексибилних пнеуматских хватаљки додатно унапредили и како би имали што већу примену у индустрији. Идеја за унапређење оваквих актуатора довела је до тога да се у развијени систем флексибилних хватаљки додају сензори силе, како би се побољшала управљивост и проширио спектар примене ових хватаљки. Додавање сензора силе на прсте хватаљке није једноставно. Потребно је додати довољно мале (микро) или подједнако флексибилне сензоре који мере силу на самом прсту, а да при томе не утичу на флексибилне карактеристике пнеуматске хватаљке.

Да би остварили жељену силу у флексибилној хватаљци, потребно је да регулишемо притисак ваздуха који делује на унутрашње зидове самог прста хватаљке. Жељена вредност ваздуха под притиском на улазу у сам актуатор може се остварити ако се у пнеуматски систем дода пропорционални регулатор притиска. Пропорционално доведеном напону/струји, на излазу из регулатора добија се жељена вредност притиска. Управљање пропорционалним регулатором је могуће помоћу програмабилно логичког контролера који у себи садржи аналогни излаз са опсегом напона/струје који регулатор захтева. Додавањем флексибилних отпорника осетљивих на промену силе (енг. Force Sensing Resistor - FSR) на прсте хватаљке добијамо информацију о сили којом хватаљка делује на предмет рада. Информација о сили деловања је значајна код PID регулације ваздуха под притиском.

Идеја овог пројекта је унапређење управљачког система пнеуматских флексибилних хватаљки ради повећања њихове флексибилности у индустријским системима.

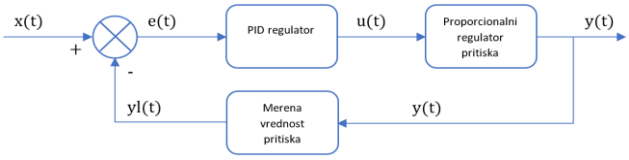
Избор компоненти система се своди на избор:

- Програмабилно логичког контролера
- Флексибилног сензора силе (FSR сензор)
- Пропорционалног регулатора притиска
- Флексибилне пнеуматске хватаљке
- Сензора притиска
- Напајања
- Осигурача
- Осталих пропратних компоненти система

Избором компоненти система прави се функционална шема према управљачкој логици ради аутоматизације управљања.

4. РЕГУЛАЦИЈА ВАЗДУХА ПОД ПРИТИСКОМ И ПОДЕШАВАЊЕ PID ПАРАМЕТАРА

Систем аутоматског управљања (САУ) који се користи у овом пројекту спада под затворени систем аутоматског управљања. Код затвореног типа САУ постоји повратна спрега која враћа информацију о вредности регулисане величине притиска у систему. Мерни уређај у пропорционалном регулатору мери тренутну вредност притиска и затим је враћа у форми електричног сигнала yl(t), који се доводи на дискриминатор. Дискриминатор представља детектор сигнала грешке e(t) и он заправо пореди сигнал стварне (измерене) вредности са сигналом задате (жељене) вредности притиска. Као резултат поређења, на излазу из дискриминатора добијамо њихову разлику (сигнал грешке) која се касније одводи ка PID регулатору. PID регулатор формира нови управљачки сигнал u(t) уз помоћ кога делује на објекат управљања (пропорционални регулатор притиска), на основу сигнала грешке e(t) који је добио. Регулација аутоматског система има за циљ да изједначи вредности жељене x(t) и стварне y(t) величине притиска, као и да доведе до тога да сигнал грешке e(t) буде једнак нули. Блок шема затвореног система аутоматског управљања приказана је на Слици 1.



Слика 1. Блок шема затвореног САУ у временском домену

У овом случају PID регулатор се може описати следећим изразом (1):

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_{-\infty}^{t} e(t)dt \qquad (1)$$

Применом Лапласових трансформација систем се пребацује у S домен. Експериментима спроведеним на пнеуматским вентилима утврђено је да се однос између протока и притиска на врху вентила за линеарни вентил често може представити преносном функцијом првог реда [4]. Преносна функција првог реда приказана је изразом (2):

$$G_0(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1} \qquad (2)$$

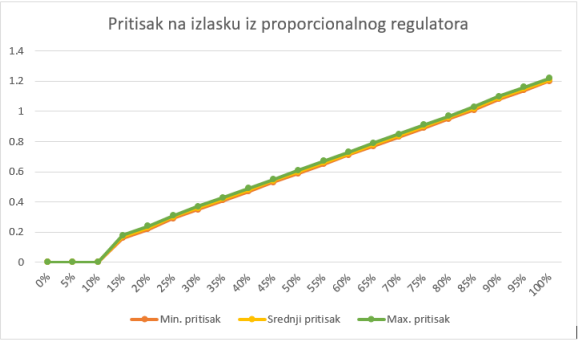
Како би се поставили структурни блокови дијаграма, потребно је применити скуп правила који су дефинисани за свођење система. Коришћењем правила комбиновања серијски везаних елемената и једначине за свођење система повратног кола, можемо добити преносну функцију система аутоматског управљања приказану изразом (3):

$$G_z(s) = \frac{K_0 * (K_d s^2 + K_p s + K_i)}{(T_0 s + 1)s + K_0 * (K_d s^2 + K_p s + K_i)} \qquad (3)$$

4.1. Подешавање PID параметара у TIA Portal софтверу

PID регулација ваздуха под притиском се врши креирањем новог data block (DB) у TIA Portal софтверу, дефинисањем улаза и излаза из креираног блока, као и подешавањем PID параметара самог система. Овај DB на улазу очекује жељену вредност која се задаје на Setpoint улазу, као и тренутну вредност која се доводи на улаз Input.

PID регулација система је остварена тако да за 0 % вредности улаза у систем, на његовом излазу добијамо притисак од 0 bar-a, а за 100 % вредности улаза добијамо притисак од 1.2 bar-a, што је уједно и максимална вредност притиска који се може наћи на уласку у флексибилну хватаљку. Излаз из пропорционалног регулатора притиска директно је повезан на флексибилну хватаљку, а на исту грану система је додат сензор притиска како би могли пратити вредност притиска у реалном времену. Након подешавања PID параметара, унете су жењене вредности на улазу у систем. За сваку вредност на улазу, посматра се на који начин систем реагује, притисак у излазној грани из регулатора, као и одзив самог система. На Слици 2 приказане су вредности притиска у излазној грани за жељене вредности 0-100 %.



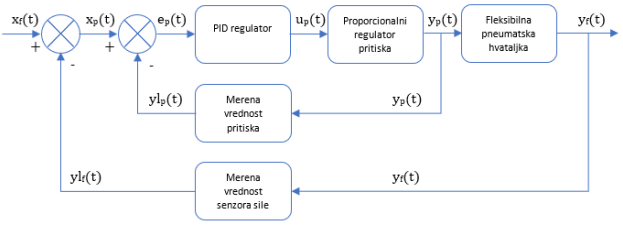
Слика 2. Вредност притиска у зависности од задатих вредности на улазу у PID

Са Слике 2 можемо видети да је наш систем линеаран. Најниже вредности притиска нису очитане због физичких ограничења сензора притиска који је додат на грану излаза из пропорционалног регулатора. Уношењем свих познатих параметара у преносну функцију добија се коначна преносна функција приказана изразом (4):

$$G_z(s) = \frac{0.029575s^2 + 0.2174s + 0.3705}{0.049575s^2 + 1.2174s + 0.3705} \qquad (4)$$

5. ИНТЕГРАЦИЈА СЕНЗОРА СИЛЕ У СИСТЕМ АУТОМАТСКЕ РЕГУЛАЦИЈЕ ПРИТИСКА

У систем су интегрисана три сензора силе (по један на сваки прст хватаљке), па се на овај начин добија повратна информација о сили. Увођењем повратне информације са сензора, систем добија могућност детекције стварне контактне силе. Овим добијамо процену тренутног стања хватања у зависности од добијених вредности са сензора, одређивање да ли је потребно повећати или смањити притисак у систему и информацију да ли је предмет ухваћен или не. На Слици 3 приказана је блок шема интеграције сензора силе у систем аутоматске регулације притиска.



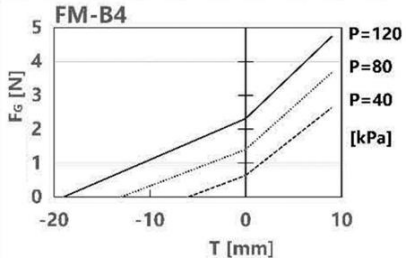
Слика 3. Вредност притиска у зависности од задатих вредности на улазу у PID

5.1. Дијаграм силе хватања, вредност притиска и вредности на сензору силе

Вредности на дијаграму са Слике 4 су одређене под следећим условима:

- Материјал прста мора бити стандардан
- Врх прста и отисак на дну морају бити LS1
- Објекат који се хвата мора бити квадратног облика
- Само врхови прстију хватају предмет
- За величину прста B, дужина додира прста са предметом је LG = 15 mm.

Приказани подаци на Слици 4 су само за референцу и вредности могу варирати у зависности од других радних услова.



Слика 4. Дијаграм силе хватања за стандардан материјал прста [5]

Тестирањем у пракси и испуњавањем горе наведених услова, можемо увезати дијаграм силе хватања са вредностима са сензора силе. Практична изведба приказана је на Слици 5.



Слика 5. Тестирање хватаљке и очитавање вредности са сензора силе

Два FM-B4V5/LS1 модула флексибилних прстију направљена од стандардних материјала хватају чврст правоугаони предмет врховима прстију. Ширина предмета је W = 45 mm, растојање између прстију Dn = 45 mm, дужина контакта са прстом је LG = 15 mm, па еластична деформација износи 0 mm.

Комбиновањем графика са Слике 2, дијаграма силе са Слике 4 и очитаних вредности са сензора силе, можемо да увежемо вредности сензора силе са вредностима притиска унутар прстију флексибилне хватаљке, као у Табели 1.

Табела 1. Однос између регулатора притиска, унутрашњег притиска хватаљке, очитане силе и силе дејства на предмет

Вредност на регулатору притиска	Вредност притиска унутар прстију флексибилне хватаљке	Просечна очитана вредност са сензора силе	Вредност силе F_G којом делујемо на предмет
35 %	0.42 bar	7850	0.7 N
65 %	0.78 bar	6500	1.4 N
100 %	1.20 bar	5800	2.3 N

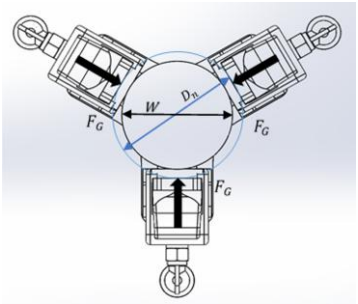
Приказане вредности у Табели 1 служе само за референцу и вредности могу варирати у зависности од других радних услова. Ове вредности не важе за другачије случајеве где имамо другачије објекте који се хватају, различита места хватања истог објекта, другачију површину хватања, већи број прстију или другачије растојање између прста и објекта који се хвата, али нам помажу да имамо оквиран увид о којим се силама ради.

6. СТУДИЈЕ СЛУЧАЈА

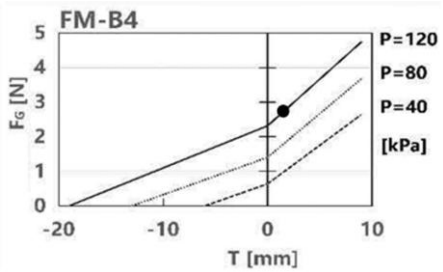
У даљем тексту су приказане три студије случаја: хватање лоптице за стони тенис, хватање киндер јајета и хватање пластичне чаше. Добијени резултати за сваки од три примера су приказани и анализирани.

6.1. Прорачун силе хватања лоптице за стони тенис

Код првог примера је извршено тестирање хватања чврстог сферног предмета - пластичне лоптице за стони тенис. Пречник лоптице износи W = 40 mm, ваздух под притиском је P = 120 kPa, а дужина контакта са прстом је приближно LG = 15 mm. Пречник растојања између прстију износи Dn = 47 mm, па еластичну деформацију можемо прорачунати: T = (W - Dn) / 3 = 2.33 mm.
На Слици 6 можемо видети димензије лоптице и хватаљке, док на Слици 7 можемо видети дијаграм за прорачун силе која делује на лоптицу за стони тенис.



Слика 6. Димензије лоптице и хватаљке



Слика 7. Дијаграм за прорачун силе која делује на лоптицу за стони тенис [5]

Читањем графика са Слике 7 лако можемо одредити колико износи сила којом хватамо сферни предмет: F_G = 2.7 N.

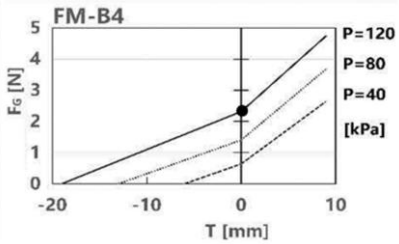
6.2. Прорачун силе хватања киндер јајета

Код другог примера је извршено тестирање флексибилних прстију који хватају киндер јаје, приказано на Слици 8.



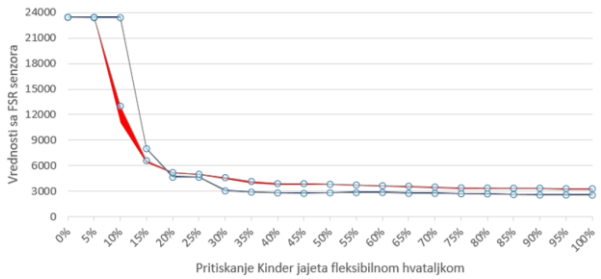
Слика 8. Хватање киндер јајета

Пречник киндер јајета у делу где се хвата износи W = 45 mm, ваздух под притиском је P = 120 kPa, а дужина контакта са прстом је приближно LG = 15 mm. Пречник растојања између прстију износи Dn = 47 mm, па еластичну деформацију можемо прорачунати: T = (W - Dn) / 3 = 0.67 mm. Читањем графика са Слике 9 можемо одредити колико износи сила којом хватамо киндер јаје: F_G = 2.3 N.



Слика 9. Дијаграм за прорачун силе која делује на киндер јаје [5]

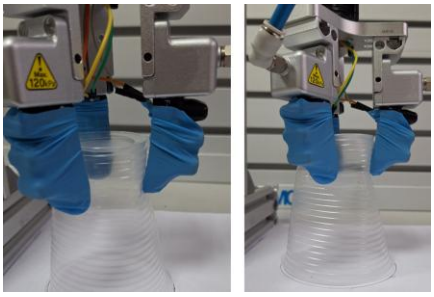
На Слици 10 приказана су два различита мерења истог киндер јајета. Минимална тачка одзива сензора силе јавља се знатно раније код хватања киндер јајета него код хватања лоптице за стони тенис. Ова разлика је последица различитих димензија објеката који се хватају. Такође, на Слици 10 може се приметити да очитане вредности нису идентичне при два мерења истог објекта. До овакве разлике долази када се објекат не постави на исто место хватања. Из овог може се закључити да је поновљивост позиционирања објекта приликом хватања од кључног значаја како би очитане вредности са сензора биле идентичне и предвидљиве.



Слика 10. Вредности сензора силе у приликом хватања киндер јајета на два различита места

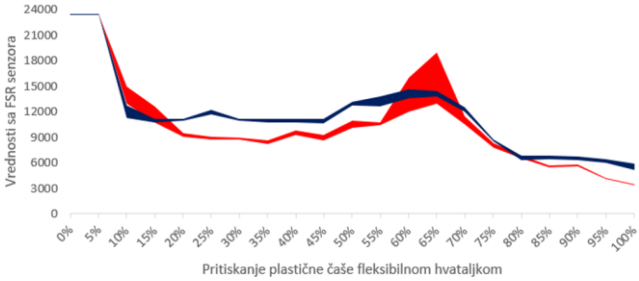
6.3. Хватање пластичне чаше у њеном средишњем делу

На Слици 11 је приказано хватање пластичне чаше у њеном средишњем делу. Може се уочити одређеним тренуцима чаша трпи пластичне деформације, што директно утиче на очитане вредности добијене са сензора силе.



Слика 11. Хватање пластичне чаше у њеном средишњем делу

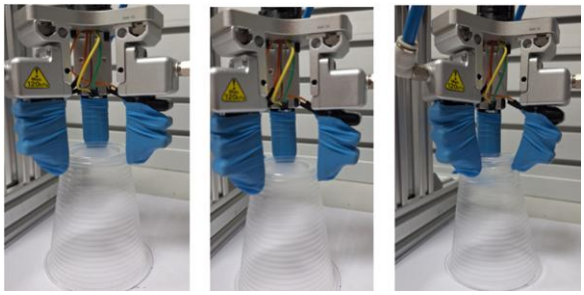
На Слици 12 приказана су мерења две различите пластичне чаше са хватањем на њиховом средишњем делу. Димензије чаше, као и њене пластичне особине доводе до значајних осцилација у вредностима очитаним са сензора силе, због чега не можемо са сигурношћу закључити да ли је чаша лепо ухваћена или се налази у стању деформације. Минимална тачка одзива сензора силе појављује се одмах након 5 % максималног притиска, али у том подручју вредности веома осцилују. Може се уочити да се сила хватања повећава као и код чврстих предмета. При даљем повећању притиска у флексибилној хватаљци очекивало би се додатно смањење напона, али услед пластичних деформација долази до смањења додирне површина између чаше и хватаљке, што се манифестује порастом напона и привидним смањењем силе хватања. У том тренутку осцилације вредности са сензора постају значајно изражене. Након завршетка фазе пластичне деформације, даљи пораст притиска опет доводи до повећања силе на сензору. Овакво хватање пластичне чаше се показује као изразито непоуздано, јер није могуће разликовати да ли је пораст напона последица лошег хватања чаше или њене пластичне деформације. Због тога се је потребно променити приступ и позиција хватања, при чему се најчешће бира део чаше са најмање пластичних деформација – сам руб.



Слика 12. Вредности сензора силе приликом хватања две пластичне чаше у њеним средишним деловима

6.4. Хватање пластичне чаше за руб чаше

На Слици 13 приказано је хватање чаше за њен руб. Уочава се да је контактна површина између флексибилне хватаљке и чаше знатно мања, као и да су деформације које настају приликом хватања минималне.



Слика 13. Хватање пластичне чаше за њен руб

На Слици 14 приказане су вредности очитане са сензора силе приликом хватања пластичне чаше у њеном доњем делу. Како је пречник чаше у овој зони знатно мањи, минимална потребна сила за детекцију постиже се при већем притиску у односу на случај у претходном примеру. На графикону се јасно види да су осцилације са сензора силе знатно мање него у случају хватања чашу у средњем делу, што указује на стабилнији контакт и мањи степен деформације. Након тренутка од 70 % максималног притиска, јављају се благе пластичне деформације које утичу на вредности. Већ након 75 % максималног притиска, вредности сензора поново показују стабилан тренд опадања отпорности и напона, па се може закључити да су пластичне деформације биле минималне и краткотрајне. На основу резултата мерења може се закључити да је дно чаше најпогодније место за хватање оваквих типова пластичних чаша, јер се у том подручју јављају најмање деформације.



Слика 14. Вредности сензора силе приликом хватања две пластичне чаше за њихов руб

6.5. Дискусија

Анализом извршених мерења може се уочити да пиезорезистивни сензор силе показује поуздано и предвидиво понашање приликом хватања чврстих објеката, док механичке особине самог објекта имају значајан утицај на стабилност очитаних вредности. Код лоптице и киндер јајета, која имају мале еластичне деформације, минимална тачка одзива сензора јавља се релативно рано. Ипак, забележене су разлике у очитавањима истог објекта које потичу од варијација у положају хватања, чиме је потврђено да поновљивост позиционирања има пресудну улогу у стабилности и тачности мерења.

Због изражене пластичности материјала и променљивог пречника, пластичне чаше показују сложеније понашање при хватању. Хватање у средишњем делу доводи до значајних деформација које узрокују велике осцилације у вредностима сензора и онемогућавају поуздану процену стварне силе хватања. Насупрот томе, хватање чаше за њен доњи део даје знатно стабилније резултате у поређењу са хватањем у средишној зони. Осцилације су и даље присутне, али су знатно мање изражене. Свеукупно, резултати показују да је механичко понашање објекта који се хвата кључни фактор у интерпретацији сензорских података. Пиезорезистивни сензор силе даје најстабилније и најпоузданије резултате када су деформације објекта минималне и када је контакт хватаљке са објектом добро дефинисан и поновљив.

7. ЗАКЉУЧАК

У овом мастер раду разматран је развој и унапређење система флексибилних пнеуматских хватаљки са циљем повећања њихове управљивости и проширења могућности примене у индустријски аутоматизованим процесима. Посебан акценат стављен је на интеграцију сензора силе у постојећи пнеуматски систем, као и на регулацију ваздуха под притиском помоћу PID регулатора имплементираног у програмабилно логичком контролеру.

У теоријском делу рада дефинисан је задатак система и извршен је избор кључних компоненти и пројектоване су електрична и пнеуматска шема система.

Имплементацијом PID регулације притиска омогућено је прецизно управљање ваздухом под притиском који делује на прсте хватаљке, док је интеграцијом сензора силе обезбеђена повратна информација о сили хватања. Тиме је остварен значајан корак ка побољшању управљивости флексибилних пнеуматских хватаљки, јер регулација више није заснована искључиво на притиску, већ и на реалном контакту са предметом рада.

Експериментални део рада обухватио је мерења силе при хватању три различита објекта, чиме је анализиран утицај механичких карактеристика објекта на понашање система. Сензор силе даје поуздане и стабилне резултате у условима минималних деформација објекта и поновљивог контакта хватаљке са предметом, а начин и место хватања имају значајан утицај на квалитет мерних података.

На основу добијених резултата може се закључити да интеграција сензора силе у систем аутоматске регулације притиска представља ефикасан начин унапређења флексибилних пнеуматских хватаљки. Овакав приступ омогућава прецизније и сигурније хватање различитих објеката, чиме се повећава флексибилност и применљивост система у индустријским условима.

Упркос оствареним резултатима, идентификовани су и одређени недостаци система који представљају простор за даљи развој и унапређење. Пре свега, пиезорезистивни сензори силе показују осетљивост на промене контактне површине и положаја хватања, што може довести до варијација у мерењу силе. Будућа унапређења могу обухватити примену напреднијих и флексибилнијих сензора силе, развој нових алгоритама регулације који комбинују притисак и силу, као и проширење система додатним сензорима ради боље процене стања хватања.

8. ЛИТЕРАТУРА

[1] R. Rao, „What are End-Effectors? Types of End Effectors in Robotics and Applications“, Smart Robotics, 2024. Dostupno na internet stranici: https://smart-robotics.io/end-effectors/, pristupljeno dana 01.12.2025.

[2] StandardBots, „Different types of end effectors in robotics: Your complete guide“, StandardBots, 2025. Dostupno na internet stranici: https://standardbots.com/blog/types-of-end-effectors-essential-tools-for-industrial-automation, pristupljeno dana 02.12.2025. , DOI: 10.1007/s43154-021-00054-5.

[4] Dr. Vladimir Šinik, „Automatsko upravljanje“, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, 2018, ISBN: 978-86-7672-231-0, Dostupno na internet stranici: https://www.scribd.com/document/727379538/Automatsko-upravljanje, pristupljeno dana 01.12.2025.

[5] Internet stranica: https://asenc.co.th/gripper/soft_gripper.pdf, preuzet Gripping Force dijagram i pristupljeno dana 15.11.2025.

Кратка биографија:



Момир Ћирковић рођен је у Ужицу 1997. год. Основне академске студије је завршио на Факултету техничких наука у Новом Саду на смеру Мехатроника.
Контакт: momircirkovic19@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 7.5
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35IH03Mancev

Развој модула за навигацију мобилне платформе заснованог на Raspberry Pi микрорачунару и фузије сензора

Development of a Mobile Platform Navigation Module Based on the Raspberry Pi Microcomputer and Sensor Fusion

Марко Манчев, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Област – МЕХАТРОНИКА

Кратак садржај – *У овом раду приказана је реализација модула за навигацију мобилне платформе са GPS модулом и магнетометарским сензором. Дат је комплетан развој овог модула, са одабиром свих компоненти које су коришћене. Описано је тестирање свих компоненти појединачно, као и заједно у модулу за навигацију. Дати су предлози за даљи развој модула за навигацију, у виду додавања сензора и алгоритама кретања.*

Кључне речи (три до пет): *Навигација, Мобилна платформа, GPS модул, магнетометарски сензор, Raspberry Pi микрорачунар*

Abstract – *This paper presents the implementation of a mobile platform navigation module with GPS modules and magnetometer sensors. A complete development of the mobile platform navigation module is provided, with a selection of all components used. The testing of all components individually, as well as together in the navigation module, is described. Suggestions are given for further development of the navigation module, in the form of adding sensors and movement algorithms.*

Keywords: (three to five): *Navigation, Mobile platform, GPS module, magnetometer sensor, Raspberry Pi microcomputer*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био ванр. проф. др Ласло Тарјан.

1. УВОД

У данашње време, доста сензора се користи за праћење кретања возила и њихове оријентације на отвореном простору. *GPS* (енгл. *Global Positioning System*) је систем који пружа поуздане информације о локацији и времену предмета у сваком тренутку и у свим временским условима на Земљи и заснован је на *GNSS* (енгл. *Global Navigation Satellite System*) систему [1]. Са друге стране, магнетометар је инструмент за мерење јачине магнетног поља и представља сензор који може да мери константно или променљиво магнетно поље [2]. У даљем тексту је описано решење на Raspberry Pi микрорачунару на који је интегрисан GPS модул и магнетометар. Пре одабира правог сензора за позиционирање, потребно је проучити разне употребе GPS модула и магнетометарских сензора у различитим описаним пројектима који су се имплементирали у индустрији.

У раду [3] представљен је систем где се *GPS* модул користио за детектовање сопствене позиције дрона. Координате о сопственој позицији су се процењивале по растојањима рачунатих из разлике времена између радио сигнала послатих од сателита и системског времена микрокомпјутера; антена која се користила овде је била *MTK* 3339. Конкретно, употребљен је *Adafruit Ultimate GPS Breakout*. Овај модул комуницира серијским путем, тј. *UART* (енгл. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) комуникацијом.
Следећи рад [4] описује систем у коме се *GPS* модул користио као примарни референтни извор за синхронизацију времена. Употребљен је модул *L76K GNSS* компаније *Quectel*. Модул такође користи *UART* комуникацију, и тако остварује бидирекциону комуникацију. Модул подржава дуал-мод операције тако што симултано користи *GPS* и *BDS* (енгл. *BeiDou Navigation Satellite System*) системе, што омогућава временску прецизност уз минимално кашњење.
Рад [5] објашњава магнетометарски сензор у функцији високо прецизног дигиталног компаса. Сензор служи за мерење магнетског поља и пружа високу тачност мерења компоненти геомагнетног поља у три правца. Користи се како би пружио информације о јачини магнетног поља у X, Y и Z правцима. Када се сензор постави хоризонтално, у његовој равни се налазе X и Y осе. Све три осе су нормалне једна на другу, X представља правац унапред, Y оса се налази десно у односу на X осу, а Z оса је нормална на хоризонталну раван сензора и усмерена је од сензора.

2. РАЗВОЈ МОДУЛА ЗА НАВИГАЦИЈУ

Модул за навигацију има задатак да прати тренутну позицију и оријентацију мобилне платформе у простору и да на основу унапред задате листе координата, које платформа треба да обиђе током путање кретања, врши навигацију, тј. даје све неопходне информације драјверу за управљање кретањем (енгл. *Motion Control*).

Да би се обезбедило континуално праћење позиције и оријентације у реалном времену користиће се *GPS* сензорски модул и магнетометар. За *GPS* модул је изабран *Neo-m8n GPS module*, док је за магнетометарски сензор изабран *QMC5883P*. У даљем тексту ће бити описана ова два сензора, као и сама реализација новог модула за навигацију.

Идеја овог рада је била да се реализује комплетан независни склоп за детектовање и сналажење у простору, који би се даље користио у некој мобилној платформи. У овој структури, *GPS* модул би давао тренутне координате позиције, док би магнетометарски сензор служио за правилну оријентацију у простору према унапред задатом циљу. Такође, како би се потврдило да цео склоп ради, додат је и дисплеј за испис информација које долазе са сензора. Главна управљачка јединица која комуницира са сензорима и ради фузију података је *Raspberry Pi 3 Model B*, а направљена је и *PCB* (енгл. *Printed Circuit Board*) плоча ради лакшег повезивања компоненти. Подаци ће се, поред дисплеја, слати и преко *MQTT* (енгл. *Message Queuing Telemetry Transport*) протокола персоналном рачунару због исписа података, а касније би овај протокол могао да се користи за комуникацију са драјвером за управљање кретањем мобилне платформе.

2.1. GPS модул Neo-m8n

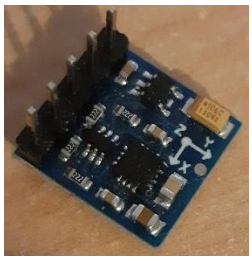
За позиционирање користиће се *GPS* модул који шаље податке серијским путем преко *UART* комуникације. Пинови који су за то задужени су *TX* (енгл. *transmit*), који служи за слање порука, и *RX* (енгл. *receive*), који служи за примање порука. Поред ових пинова, имају и 2 пина за напајање, *VCC* (енгл. *Voltage Common Collector*) и *GND* (енгл. *ground*). Модул се напаја напоном у распону од 3 до 5,5 V. Овај модул има могућности коришћења две врсте антена, *SMA* (енгл. *Sub Miniature version A*) и *IPEX*. *GPS* модул добија поруке у *NMEA* (енгл. *National Marine Electronics Association*) формату, које ће се потом рашчланити како би се добили одређени подаци [6]. Слика 1 приказује коришћени модул.



Слика 1. *GPS* модул *Neo-m8n* са *SMA* антеном

2.2. Магнетометарски сензор QMC5883P

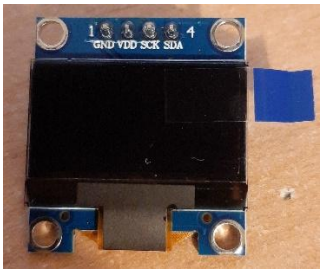
Одређивање оријентације, тј. угла закретања од жељеног правца одређиваће се помоћу магнетометарског сензора. Изабран је магнетометарски сензор ознаке *QMC5883P*. Овај модул комуницира преко I^2C комуникације. Два пина, која му то омогућавају су *SDA* (енгл. *Serial Data*) и *SCL* (енгл. *Serial Clock*). Поред ова два пина, има и пинове за напајање *VCC* и *GND*, код којих је распон напона од 2,16 до 3,6 V [7]. Сензор има могућност да детектује јачину магнетног поља у три правца нормална на њега - X, Y и Z правци. Измерене вредности се онда складиште у два осмобитна регистра, А регистар, који чува више вредности, и Б регистар, који чува ниже вредности. Комбинујући ова два регистра, добија се шеснаестобитни регистар који има нумерички опсег од 0XF800 до 0X07FF [8]. Овај сензор је изабран у односу на сензор *HMC5883L* који је раније споменут у анализи сличних пројеката, због његове доступности на тржишту. Сензор је приказан на слици 2.2.



Слика 2.1 Магнетометарски сензор *QMC5883P*

2.3. OLED 0.96 SSD1306 display

Како би резултати са магнетометарског сензора и *GPS* модула могли бити приказани на самом модулу, додат је и *OLED* (енгл. Organic Light Emitting Diode) 0.96 *SSD1306 display*. У односу на стандардни *LCD* (енгл. Liquid Crystal Display) 2x16 дисплеј, овај дисплеј је одабран јер нуди већу резолуцију, у овом случају 128x64. Дисплеј комуницира преко I^2C комуникације, те има четири пина, *GND*, *VCC*, *SDA* и *SCL*. Напајање дисплеја је у распону од 3,3 до 5 V. Овај дисплеј је приказан на слици 2.



Слика 2. *OLED 0.96 SSD1306 display*

2.4. Микрорачунар Raspberry Pi 3 Model B

Срце модула, тј. уређај који прима сигнале са сензора и обрађује их а након тога шаље на дисплеј и следећем модулу, је *Raspberry Pi 3 Model B* (слика 3). Овај *SBC* (енгл. *single-board computer*) је изабран због своје велике доступности, и лаког писања кода. Због аутономности рада у фази тестирања за напајање компјутера додата је и екстерна батерија, али се она може напајати и стабилисаним извором напајања. *Raspberry Pi* захтева напајање од 5 V и струју напајања од 2.5 A. Са њега су се користиле две комуникације, *UART* и I^2C. Пинови за *UART*, су били *TX* и *RX*, док су

за I^2C комуникацију коришћени пинови *SDA* и *SCL*. Излазни пинови за напајање на Raspberry Pi су коришћени за напајање свих сензора у модулу за навигацију.



Слика 3. *Raspberry Pi 3 Model B*

3. ТЕСТИРАЊЕ ИЗАБРАНИХ МОДУЛА

При имплементацији сваког сегмента у целину, битно је било испитати да ли појединачни модули раде како је очекивано, због чега је првобитно тестиран сваки понаособ, а затим је проверено и да ли сви заједно одговарајуће функционишу.

3.1. Тестирање GPS модула

Први модул који је тестиран је *GPS* модул. Овај модул прима информације о координатама искључиво када је небо ведро, како би био у могућности да се повеже са сателитима. Модул добија поруке у *NMEA* формату, које садрже све информације о координатама и времену. Како би ова порука била приказана потребно је да су *Raspberry Pi 3 Model B* и *GPS* модул повезани, односно да је *RX* пин компјутера повезан на *TX* пин модула, и да је *TX* пин компјутера повезан на *RX* пин модула. Такође, модул се напаја преко *SBC*, користећи слободне пинове за напајање.
Када *minicom* (порт за комуникацију преко *UART* интерфејса) прикаже задовољавајуће податке, потребно је написати скрипту у програмском језику *python*. Скрипта на основу поруке у *NMEA* формату, рашчлањује (парсира) дату поруку па потом приказује тренутну географску ширину, географску дужину и надморску висину. Ова скрипта је приказана на слици 4, док је њен испис приказан на слици 5.

```python
import serial
import pynmea2

def read_gps():
    # Open serial connection to GPS module
    gps_serial = serial.Serial("/dev/serial0", baudrate=9600, timeout=1)

    while True:
        try:
            line = gps_serial.readline().decode("ascii", errors="replace")
            if line.startswith("$GPGGA"):
                msg = pynmea2.parse(line)
                print(f"Latitude: {msg.latitude}, Longitude: {msg.longitude}")
                print(f"Altitude: {msg.altitude} {msg.altitude_units}")
        except pynmea2.ParseError as e:
            print(f"Parse error: {e}")
        except KeyboardInterrupt:
            print("Exiting...")
            break

if __name__ == "__main__":
    read_gps()
```

Слика 4. Скрипта за испис података добијених од *GPS* модула [9]

```
Latitude: 45.2688335, Longitude: 19.809798666666666
Altitude: 121.3 M
Latitude: 45.26883333333333, Longitude: 19.809799
Altitude: 121.4 M
Latitude: 45.26883333333333, Longitude: 19.809798833333332
Altitude: 121.4 M
Latitude: 45.26883333333333, Longitude: 19.8097985
Altitude: 121.3 M
Latitude: 45.26883333333333, Longitude: 19.809798333333333
Altitude: 121.3 M
Latitude: 45.26883333333333, Longitude: 19.809798
Altitude: 121.3 M
Latitude: 45.26883316666667, Longitude: 19.809797666666668
Altitude: 121.3 M
```

Слика 5. Испис *GPS* података на *terminal*

3.2. Тестирање магнетометарског сензора

Следеће је тестиран магнетометарски сензор *QMC5883P*. Као што је већ речено, сензор складишти податке у шеснаестобитни регистар. Сензор са *Raspberry Pi 3 Model B* компјутером комуницира преко I^2C комуникације. Сензор добија напајање од компјутера, са слободних пинова за напајање. Како би писање програма и тестирање било олакшано, коришћена је *PiicoDev_QMC6310* библиотека [10]. Разлика која је направљена је та што је I^2C адреса магнетометарског сензора *QMC5883P* другачија од оне коришћене у библиотеци, односно адреса овог сензора је *0x2C*. Пре самог исписа података, потребно је одрадити калибрацију сензора, што је обухваћено у скрипти у програмском језику *python*. У скрипти се, на основу информација које региструје сензор, прерачунава угао под којим је сензор заокренут. Скрипта је приказана на слици 6, а њен испис на *terminal* је приказан на слици 7.

```python
# Calibrate the sensor by turning it in a circle
# Display the heading with compensation for magnetic declination

from Magn import PiicoDev_QMC6310
from PiicoDev_Unified import sleep_ms          # Cross-platform compatible sleep function

compass = PiicoDev_QMC6310(range=800)          # Initialise the sensor with 800uT range. Valid
ranges: 200, 800, 1200, 3000 uT

# Calibration recommended for best results.
#compass.calibrate() # only need to calibrate once

# Optional: Declination is the difference between magnetic-north and true-north ("heading") and
depends on location
compass.setDeclination(5.52) # Found with: https://www.magnetic-
declination.com/Australia/Newcastle/122944.html

def compass_heading ():
   heading = compass.readHeading()   # get the heading from the sensor
   if compass.dataValid():           # Rejects invalid data
         heading = round(heading)      # round to the nearest degree
   return heading
      # print( str(heading) + "°")    # print the data with a degree symbol
      #sleep_ms(100)
```

Слика 6. Скрипта за испис података са магнетометарског сензора [10]

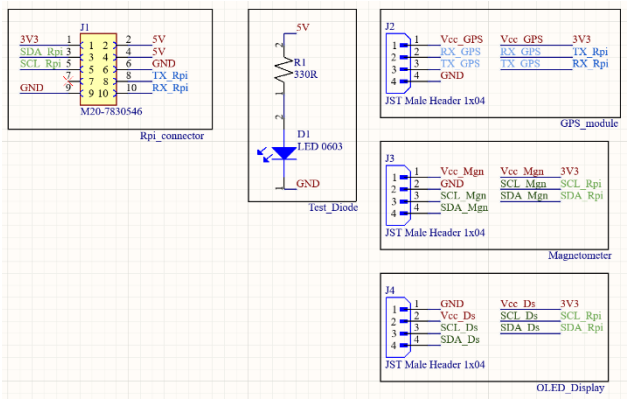
```
196°
195°
194°
198°
196°
196°
194°
194°
```

Слика 7. Испис података о углу на *terminal*

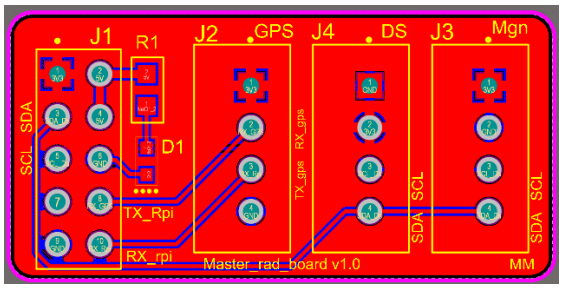
4. РЕАЛИЗАЦИЈА МОДУЛА ЗА НАВИГАЦИЈУ

У овом поглављу је описана реализација целокупног модула за навигацију и његово тестирање. Као што је то већ раније написано модул за навигацију представља систем који је задужен за добијање тренутне локације и оријентације мобилне платформе. Приказ свих обрађених информација ће бити приказан прво на дисплеју, а потом и послат преко *MQTT* протокола на други уређај, који на основу тих података врши даље управљање.

Пошто модул за навигацију чине 3 компоненте, *GPS* модул, магнетометарски сензор и дисплеј, направљена је *PCB* плоча која обезбеђује лако повезивање на *Raspberry Pi 3 Model B*. Плоча је повезана сходно правилима за сваку компоненту, која су била споменута у претходном поглављу. Такође, како би било приказано да ли плоча функционише додата је и једна диода за тестирање. Плоча је рађена у програму *Altium Designer*. Шема плоче је приказана на слици 8, док је повезивање компоненти електронске плоче приказано на слици 9.



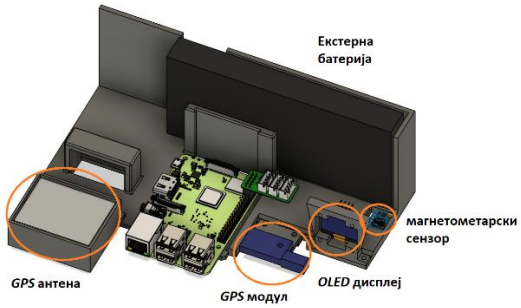
Слика 8. Шематски приказ електронске плоче



Слика 9. Повезивање компоненти на електронској плочи

Све компоненте је потребно повезати заједно у једну целину, а затим и тестирати. Направљена је заједничка носећа пластична плоча, која је одштампана на 3Д штампачу, како би сви потребни елементи били на једном месту. Целокупни склоп модула је приказан на слици 10.

Жељена путања кретања мобилне платформе, чију позицију и оријентацију треба да прати модул за навигацију, дефинисана је као текстуални фајл у ком је низ координата које треба проћи, и овај фајл је смештен на *Raspberry Pi 3 Model B* компјутеру. Током рада компјутер чита следеће жељене координате из текстуалног фајла. GPS модул прима тренутне координате и шаље их компјутеру, а магнетометарски сензор такође прима и прослеђује податке. Потом, компјутер на основу растојања тренутних координата, жељених координата и тренутног угла под којим је заокренут склоп, врши прорачун растојања и угла до следеће жељене тачке.



Слика 10. Целокупни склоп модула за навигацију

Тестирано је и да подаци о углу, дистанци и времену могу да се пренесу на неки други уређај. Ово је имплементирано и тестирано преко *MQTT* протокола, у коме постоје 3 члана за комуникацију, издавач (енгл. *publisher*), посредник (енгл. *broker*) и претплатник (енгл. *subscriber*). У овом протоколу, битна ствар је да су сви уређаји на истој мрежи, како би размена података била могућа [11]. У случају овог рада, персонални рачунар је уједно и посредник и претплатник, а *Raspberry Pi 3 Model B* је издавач. За испис података добијених преко *MQTT* протокола, коришћен је *MQTT explorer*. Такође, како би све функционисало и како би било могуће слати поруке, у програму је неопходно да се персонализовани рачунар, тј. претплатнички уређај, претплати на исту тему (енгл. *topic*) на коју издавач објављује, док је посредникова улога да размена порука буде одговарајућа [12]. Део скрипте, писан у програмском језику *python,* приказан је на слици 11, док је испис добијених података у програму *MQTT explorer* приказан на слици 12.

```
Broker_IP="192.168.100.18"
Topic_NoFix="rad/no_fix"
Topic_Fix="rad/has_fix"

try:
 line=gps_serial.readline().decode("ascii", errors="replace")
 heading = compass.readHeading()

 if line.startswith("$GNGGA"):
   msg = pynmea2.parse(line)
   Fix=msg.is_valid
   latitude = msg.latitude
   longitude = msg.longitude
   altitude = msg.altitude

 if compass.dataValid():
   heading = round(heading)
 if(Fix==True):
  latest_distance = calculate_distance(latitude, longitude, dest_lat, dest_lon)

  latest_bearing = calculate_bearing(latitude, longitude, dest_lat, dest_lon)

  relative_angle = (latest_bearing-heading) % 360

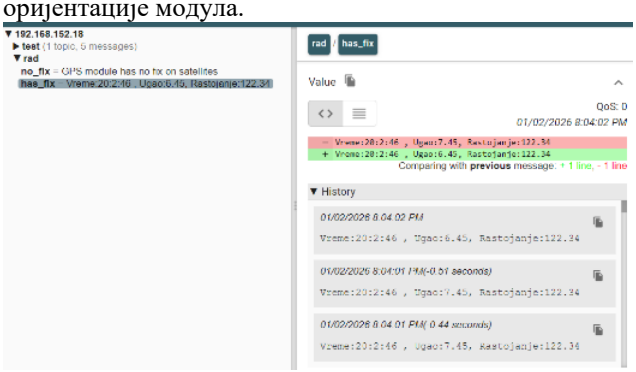
  client.publish(Topic_Fix, f"Ugao:{relative_angle}, Rastojanje:{latest_distance}")
 else:
  client.publish(Topic_NoFix, "GPS module has no fix on satellites")
```

Слика 11. Део скрипте везан за слање података од издавача до претплатника

4.1. Тестирање готовог модула за навигацију

Тестирање готовог уређаја је извршено, под ведрим небом и зимским временским условима, ради провере података са сензора и њихових исписа на дисплеј. Модул за навигацију је био тестиран тако што

се посматрала раздаљина између тренутне и жељене позиције; и када је она била довољно мала на дисплеју је приказана одговарајућа порука. Овај принцип тестирања је био примењен на две различите жељене локације и поред зимских услова модул за навигацију је давао коректне резултате координата локације и оријентације модула.



Слика 12. Испис добијених података у програму *MQTT explorer*

5. ЗАКЉУЧАК

Развијени модул за навигацију мобилне платформе, који је реализован помоћу GPS пријемника и магнетометра је током тестирања приказао задовољавајуће резултате у погледу давања позиције и оријентације самог модула. Даље се поменути модул може интегрисати на мобилну платформу без икаквих додатних дорада. У овој верзији, тренутни модул податке ка следећој компоненти, шаље у виду MQTT порука, али по потреби могао би се имплементирати и неки други тип протокола. Даљи развој модула би могао да се огледа у виду додавања сензора ради избегавања препрека током кретања у виду ултразвучних, *LiDAR*-а (енгл. *Light Detection and Ranging*), камера или фузије више сензора, као и развоја алгоритма за паметно мапирање и избегавање препрека.

Други сегмент који би захтевао даљи развој је кориснички интерфејс у виду неке мобилне апликације, помоћу које би корисник лако могао да задаје захтевану путању кретања мобилне платформе у текстуалном облику или обележавањем на некој конкретној онлајн мапи.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] A. Damani, H. Shah, K. Shah, and M. Vala, “Global-positions-systems for objects tracks,” Int, J, Comput. Appl., vol. 109, no. 8, p. 3977–3984, 2015.

[2] S. Bratić, Đ. Prosenica, Lj. Gajić, S. Terzić, S. Kasapović, M. Urekar, “ Comparing Filter Efficiency: Complementary vs. Kalman Filters on Accelerometer and Gyroscope Signals ” , University of Novi Sad, August 2024

[3] M. Kan, S. Okamoto, and J. Hoon Lee, “ Development of Drone Capable of Autonomous Flight Using GPS ”, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2018 Vol II IMECS 2018, March 14-16, 2018, Hong Kong

[4] H. Mu, M. Yung, “A full-duplex voice communication system based on GNSS time synchronization and LoRa transmission”, School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China, 2025

[5] T. He, F. Li, Y. Du, Y. Zhang, Y. Li, Y. Liu, “Design and implementation of digital compass based on HMC5883L magnetoresistive sensor”, Sichuan Vocational College of Information Technology, Guangyan 628017, Sichuan, China, 2025

[6] U-blox, “NEO-8 series”, https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf (Приступљено јануар 2026)

[7] Adafruit, “Adafruit HMC5883L Breakout - Triple-Axis Magnetometer Compass Sensor”, https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-hmc5883l-breakout-triple-axis-magnetometer-compass-sensor.pdf (Приступљено јануар 2026)

[8] T. He, F. Li, Y. Du, Y. Zhang, Y. Li, Y. Liu, “Design and implementation of digital compass based on HMC5883L magnetoresistive sensor”, Sichuan Vocational College of Information Technology, Guangyan 628017, Sichuan, China, 2025

[9] “Using the NEO-6M GPS Module with the Raspberry Pi”, https://38-3d.co.uk/blogs/blog/using-the-neo-6m-gps-module-with-the-raspberry-pi (Приступљено јануар 2026)

[10] Core Electronics, “PiicoDev Magnetometer-Getting Started Guide”, https://core-electronics.com.au/guides/piicodev/piicodev-magnetometer-getting-started-guide/ (Приступљено јануар 2026)

[11] U. Hunkeler, H. L. Truong and A. Stanford-Clark, "MQTT-S — A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks," 2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08), Bangalore, India, 2008, pp. 791-798, doi: 10.1109/COMSWA.2008.4554519.

[12] A. Morchid, R. Jebabra, H. Qjidaa, R. El Alami, M. Ouazzani Jamil, “Agri-tech innovations for sustainability: A fire detection system based on MQTT broker and IoT to improve environmental risk management”, December 2024

Кратка биографија:



Марко Манчев рођен је у Новом Саду 2001. год. Дипломски рад под називом „Механички актуисан аутоматски измењивач алата пројектован за индустријског робота ABB IRB140“ на Факултету техничких наука одбранио је 2024.године.

Контакт: markomnc.mancev@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 7.52
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35IH04Sandor

IoT систем за надзор кошнице

IoT System for Monitoring Beehives

Флориан Шандор, Гордана Остојић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – МЕХАТРОНИКА

Кратак садржај – *Тема рада је пројектовање IoT система за надзор кошнице која омогућава праћење мерења сензора унутар кошнице и сензора на пчелињаку. Сензорски систем се састоји од паметних сензора, гејтвеј уређаја, који је задужен за комуникацију са сервером преко мобилне мреже, и од локалног сервера који помоћу Homeassistant аплукације омогућава приступ подацима и статистикама.*
Кључне речи: *Паметни сензори, Надзор пчелињака, Homeassistant, RS485 комуникација*

Abstract – *The topic of the thesis is the development of an IoT system used for monitoring beehives, reading measurements from sensors inside the hive boxes and sensors located at the aviary. The sensor system is composed of smart sensors, gateway device responsible for communicating with the server via the mobile network, and a local server running Homeassistant application to display measurements and statistics gathered at the aviary.*

Keywords: *Smart sensors, Beehive monitoring, Homeassistant, RS485 communication*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Гордана Остојић, ред. проф.

1. УВОД

Тема овог рада је пројектовање поузданог и флексибилног *IoT* (*Internet of Things*) система (даље Систем паметне кошнице) који омогућује надзор пчелињака. Систем паметне кошнице може да се користи на удаљеним местима где није доступан дистрибутивни систем електричне енергије, који користи робусне индустријске комуникационе протоколе за комуникацију између сензора, који је састављен од лако доступног хардвера и софтвера.

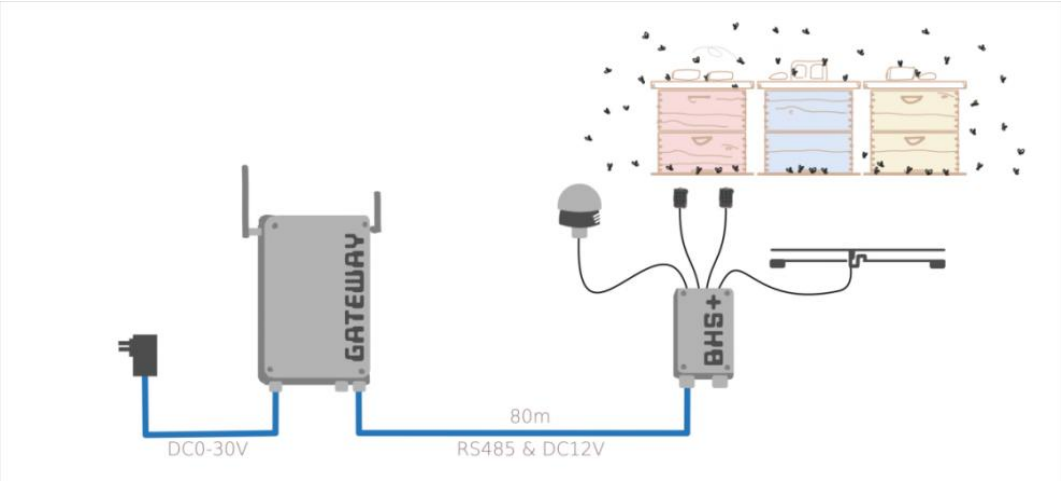
2. АРХИТЕКТУРА СЕНЗОРСКОГ СИСТЕМА

Да би систем био функционалан, потребна је међусобна сарадња више уређаја, који врше следеће функције: очитавају сензоре, скупљају податке, врше комуникацију преко мобилне мреже, приказују и чувају податке.
Целокупни систем се може поделити на два дела, локални систем и сервер. Локални систем је скуп уређаја који се налазе на пчелињаку. Локални уређаји комуницирају међусобно. Локални систем се састоји од два типа уређаја:
1. Сензорски уређај – Његова улога је да очитава сензоре. Сензорски уређај користи Atmega168/ Atmega328p микроконтролере.
2. Гејтвеј уређај – скупља измерене податке од сензорских уређаја и комуницира са сервером преко Wi-Fi мреже или преко LTE/4G мобилне мреже. У локалном систему он служи као мастер осталим сензорским уређајима. Гејтвеј уређај се базира на ESP32 [1] микроконтролеру.

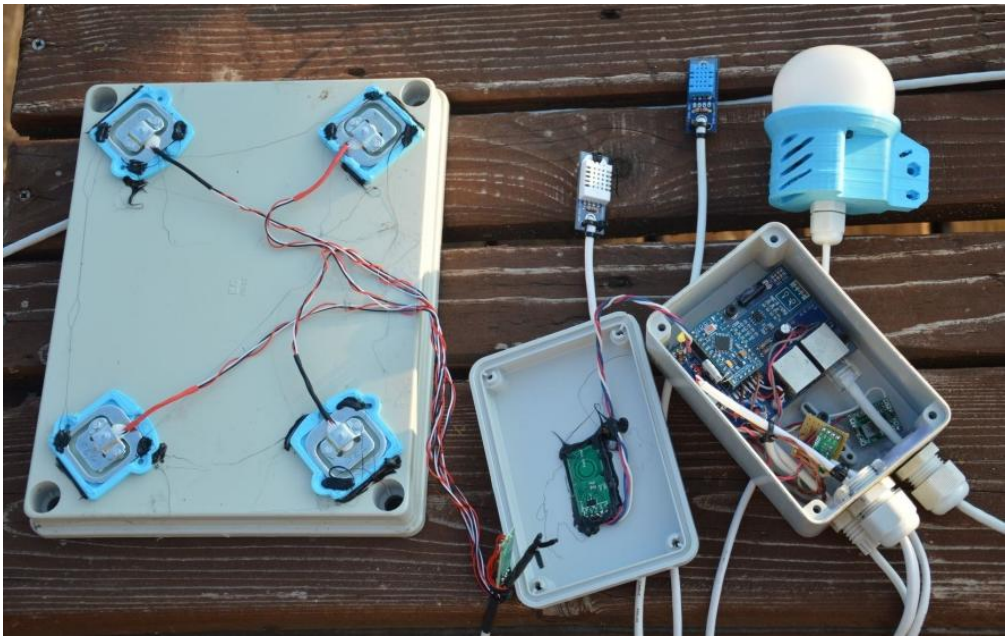
Распоред уређаја на нивоу локалног система може да се прилагоди датом пчелињаку. Систем паметне кошнице може да се напаја помоћу соларне енергије или мрежне утичнице, може имати један или два сензорска уређаја или може имати сензорски уређај који је повезан са додатним сензорима по потреби. Једна конфигурација система је приказана на слици 1.

3. СЕНЗОРСКИ УРЕЂАЈ

Сензорски уређај је embedded уређај који се поставља непосредно поред кошнице. Његови сензори се постављају унутар кошнице или непосредно поред улазног отвора у кошницу. Улога овог уређаја је да повремено очитава стања са сензора и по пријему команде од Гејтвеја проследи форматиране и филтриране мерене величине Гејтвеј уређају. Сензорски уређај заједно са својим сензорима може се сматрати као један „паметан сензор“ који мери више параметара околине и може се очитати слањем одговарајуће команде преко RS485 [2] комуникационе линије. Сензорски уређај може бити један од две варијанте, обичан сензорски уређај или унапређени сензорски уређај. Варијанте се разликују у броју и врсти њихових сензора. Ове разлике су приказане у табели 1. Унапређени сензорски уређај са прикљученим сензорима је приказан на слици 2.



Слика 1. Мрежна конфигурација паметне кошнице



Слика 2. Унапређени сензорски уређај са прикљученим сензорима

Табела 1. Доступни сензори по врсти сензорског уређаја

	Сензорски уређај	Унапређени сензорски уређај
Температура унутар кошнице	X	X
Влажност ваздуха унутар кошнице	X	X
Амбијентална температура		X
Амбијентална влажност ваздуха		X
Амбијентални интензитет светлости		X
Вага (тежина кошнице)		X
Микроталасни сензор покрета	X	X

4. ГЕЈТВЕЈ УРЕЂАЈ

Гејтвеј уређај се налази на пчелињаку, служи за управљање локалним IoT системом. Његове функције су:

• Прати стање система, мери напон батерије и соларног панела, прати позицију пчелињака и ажурира време на основу GNSS (Global Navigation Satelite System) података.

• Обавештава сервер о свом стању - шаље поруке које садрже основне информације у вези сензорског система и Гејтвеј уређаја.

• Прикупља мерења од сензорских уређаја, форматира податке и прослеђује серверу.

• Укључује/искључује напајање сензорским уређајима ради штедње енергије или да би ресетовао нефункционалан сензорски уређај.

Гејтвеј уређај је повезан на интернет преко мобилне мреже. Ова веза се реализује помоћу SIM7000G [3] комуникационог модула.

5. СЕРВЕР/ ПРИКАЗ МЕРЕЊА

Параметри измерени сензорима треба да буду доступни помоћу веб или мобилне апликације. Ради лакшег приступа серверу, систем паметне кошнице користи локални сервер. Хардвер сервера је мини PC (односно раније Raspberry Pi 3). Гејтвеј уређај паметне кошнице комуницира са Homeassistant апликацијом помоћу websocket-a (алтернативно омогућена је комуникација и преко MQTT-a). Homeassistant је предвиђен за системе паметне куће, али у овом случају се користи за складиштење и приказ мерења сензора из система паметне кошнице – Систем паметне кошнице може да се надогради на постојећи систем паметне куће, и да се интегрише у друге системе као на пример Grafana, Influx-db који су компатибилни са Homeassistant-ом. За потребе система паметне кошнице, написана је такозвана Homeassistant Custom integration – интеграција, односно модул који омогућава комуникацију између гејтвеј уређаја и Homeassistant апликације.

6. ТЕСТИРАЊЕ СИСТЕМА

Период тестирања је трајао од августа до децембра 2024. Систем паметне кошнице је био постављен на пчелињаку у конфигурацији приказаној на слици 1. Сензори проширеног сензорског уређаја су били уграђени у две кошнице.

6.1. Иницијални проблеми система

Имплементација није била без грешке, систем је имао неколико проблема и било је јако тешко дебаговати из даљине, јер једина информација је да подаци нису стигли до сервера из неког разлога.

Неки од проблема су били:

Грешке у програму микроконтролера Гејтвеј уређаја – error handling SIM модема није био довољно поуздан. такође корисник нема информацију да ли SIM картица има довољан кредит.

Проблеми са соларним системом –акумулатор је био оштећен током тестирања.

Влага/вода је ушла у сензорски уређај, и изазвала комплетно блокирање Сензорског система.

6.2. Резултати тестирања система

Сензорски уређај је опремљен сензориама температуре, истовремено може да мери температуру и влажност ваздуха унутар две различите кошнице (плави и бели рој) као и амбијенталну температуру и влажност ваздуха на пчелињаку. Параметри мерења се снимају током сезоне и чувају се на серверу система паметне кошнице.

На слици 3 су приказана мерења интензитета светлости, температуре и влажности ваздуха унутар плаве и беле кошнице током периода који траје оквирно две недеље.

График интензитета светлости има два локална максимума током једног дана јер су кошнице позициониране тако да су у хладу када је најтоплији део дана. У првом делу посматраног периода температуре и влажности ваздуха унутар кошнице су у прихватљивим границама. На основу мерења је примећено да подаци о температури унутар кошнице могу да указују на “јачину” роја, температура варира током дана, међутим присуство пчела ублажава варијације, види се да рој регулише температуру до неке мере, одступање између амбијенталне и унутрашње температуре је најизраженије током ноћи.

Пчелар може да употреби ове информације да би преместио кошнице на оптималну локацију, где је кошница делимично у хладу, и тако смањи период повишене температуре унутар кошнице .

Други део периода на слици 3 приказује период једне олује и кишовитог времена, види се нагли раст у амбијенталној влажности ваздуха током овог периода. Температура се значајно смањила у кошницама, влажност постепено расте из дана у дан, овакво стање је потенцијално абнормално, претпоставка је да су се пчеле скупиле на рамовима у доњој кутији ЛР кошнице, док сензори мере параметре у горњој кутији кошнице.

Сензорски систем омогућава правовремену реакцију на овакве екстремне услове.

Касније, почетком октобра систем паметне кошнице је регистровао тренутак ројења плавог роја, промене су видљиве по мерењима, међутим у то време се није препознала појава, да се минимална дневна температура ројењем погођене кошнице, за разлику од друге посматране кошнице, све више тежи амбијенталној.

Медоносна пчела је активна по лепом и сунчаном времену. Она излеће из кошнице када је спољна темпертура ваздуха изнад 12,7 °C. Хладно време смањује активност пчела у пољу [4]. Једна од претпоставки је да информација о амбиенталној температури, тачније број укупних сати по температурама може да указује на активност роја и евентуално на количину прикупљеног меда на крају сезоне, међутим ово током тест периода није се успело утврдити због мањка информације и кратког периода посматрања роја.



Слика 3. Мерења доступна пчелару, приказана на web страници помоћу локалног сервера и Grafane

7. ЗАКЉУЧАК

У будућности, планиран је развој нове верзије система, који ће узети у обзир мане овог система и биће базиран на искуствима овог пројекта – сензори ће бити самостални (без Гејтевеј уређаја), нови систем паметне кошнице ће наследити сензоре и комплетан сервер/ Docker/Homeassistant имплементацију од тренутног система.

8. ЛИТЕРАТУРА

[1] https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/index.html (pristupljeno u februaru 2026.)

[2] Thomas Kugelstadt, *"Application Note - The RS-485 Design Guide"*, Texas Instruments Incorporated, 2022.

[3] SIMCom Wireless Solutions Ltd, *"SIM7000 Series_Quick Start Application Guide V1.00."*, Shanghai, 2019.

[4] dr Nebojša Nedić dr Nada Plavša, *"PRAKTIKUM IZ PČELARSTVA"*, Novi Sad, 2015.

Кратка биографија:



Флориан Шандор
рођен је у Суботици 1998. год. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Мехатронике одбранио је 2021.год.
Контакт: fflori4n@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 528.7
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35KG01Ristic

Екстракција геометрије кровова објеката на основу облака тачака добијеног применом *UAV* фотограметрије

Extraction of Building Roof Geometry Based on Point Clouds Obtained Through UAV Photogrammetry

Емилија Ристић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Област – ГЕОДЕЗИЈА И ГЕОИНФОРМАТИКА

Кратак садржај – *Предмет овог рада је аутоматска екстракција кровова објеката из облака тачака добијеног на основу прикупљених фотографија применом беспилотне летелице, уз коришћење софтверских решења за обраду фотограметријских података. Циљ обраде је прецизна векторизација кровова објеката..*

Кључне речи: *Беспилотна летелица /фотограметр – ија / екстракција /облак тачака.*

Abstract – *The subject of this paper is the automatic extraction of roofs from point clouds collected using an unmanned aerial vehicle, combined with software solutions for processing photogrammetric data. The goal of the processing is the precise vectorization of house roofs.*

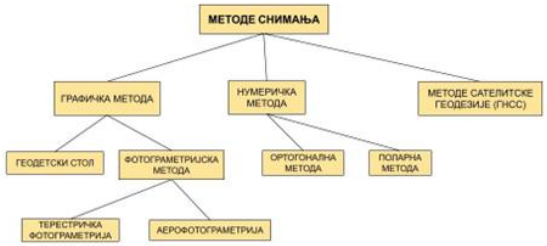
Keywords: *UAV / Photogrammetry / Extraction / Point Cloud.*

1. УВОД

Напредак технологије омогућава све веће и прецизније коришћење геопросторних података у различитим дисциплинама, као што су геодезија, архитектура, урбанистичко планирање и грађевинарство. Једна од најзначајнијих иновација у овом пољу је употреба беспилотних летелица, *UAV* (енгл.: *Unmanned Aerial Vehicle*), и фотограметријских техника за прикупљање и обраду података у 3Д формату. У оквиру овог рада, посебна пажња посвећена је аутоматској екстракцији кровова објеката из облака тачака добијених *UAV* фотограметријом, са циљем креирања 3Д модела који могу бити примењени у различитим областима, као што су планирање инфраструктуре и архитектонска реконструкција.

2. МЕТОДЕ ПРИКУПЉАЊА ГЕОПРОСТОРНИХ ПОДАТАКА

Под мерењем (снимањем) детаља подразумева се прикупљање теренских података за тачке које геометријски одређују детаљ, у циљу израде плана или карте тог детаља. Ови подаци треба да на плану или карти дефинишу положај детаљних тачака, односно детаља који је предмет премера. Начин прикупљања теренских података назива се методом снимања детаља или премер земљишта [1].



Слика 1. Методе снимања у геодезији

3. БЕСПИЛОТНЕ ЛЕТЕЛИЦЕ

Беспилотна летелица, или популарно дрон (енгл. drone — „трут"), је ваздухоплов којим управља навигатор или пилот са даљинским преносом сигнала са земље, или који лети аутономно по унапред задатим путањама. *UAV* систем састоји се од платформе (летелице), сензора монтираних на њу и контролне станице на земљи, одакле се управља системом. Подизање летелице у ваздух омогућава аеродинамичка снага. Према начину полетања и слетања, беспилотне летелице се деле на оне са хоризонталним полетањем и слетањем и вертикалним полетањем и слетањем. *UAV* систем састоји се од тела израђеног од ултра лаких материјала, различитих сензора (*GNSS* пријемник, *IMU, LiDAR*, жироскоп, акцелерометар, барометар, камере – *RGB*, мултиспектралне, *NIR*), погонског система, сервомотора и батерија. Такође, укључује систем за детекцију и избегавање препрека, систем за комуникацију (контролна станица, радио предајник), као и софтвер за планирање лета, мапирање, полетање, слетање и обраду података [2].

3.1. Карактеристике и опис коришћене беспилотне летелице

Parrot Anafi је напредана беспилотна летелица са камером од 21 *MP* и могућношћу снимања у 4*K HDR*,

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Марко Марковић, ванр. проф.

који пружа високу резолуцију и прецизност за фотограметријске примене, омогућавајући креирање 3Д модела и облака тачака путем фотограметријских софтвера као што су *Pix4D* и *Agisoft Metashape*, уз подршку за планирање мисија преко апликације *Parrot FreeFlight 6*, што га чини погодним за инжењерске и грађевинске пројекте [3].

3.2. Функционисање *UAV* система

Функционисање *UAV* система засновано је на примени аеродинамике, електронике и закона физике. Беспилотне летелице користе роторе за генерисање потиска, омогућавајући летелицама да се одрже у ваздуху балансирањем сила као што су гравитација и отпор ваздуха. Контролер лета управља моторима на основу података са сензора попут акцелерометра, жироскопа и *GNSS-a*, обезбеђујући стабилизацију и прецизно маневрисање. Промена брзине ротора омогућава кретање у различитим правцима и ротацију око осе. Комуникација између беспилотне летелице и контролера остварује се путем радио сигнала, док напредне технологије компресије и преноса података омогућавају пренос слика и видео записа у реалном времену. Савремене литијум-јонске и литијум-полимерске батерије високог капацитета обезбеђују енергију потребну за дуготрајан и поуздан лет. Овај интегрисани систем комбинује аеродинамичке, механичке и електронске компоненте ради стабилног и ефикасног управљања летелицом [4].

3.3. Законска регулатива

Законска регулатива у Републици Србији, заснована на Закону о ваздушном саобраћају, прописује услове за безбедно коришћење беспилотних летелица, њихово разврставање по маси при полетању (*MTO*), евиденцију и одржавање, уз дефинисање изузетака и ограничења, као и посебних услова за летење на висинама већим од 100*m* или у близини аеродрома, чиме се осигурава безбедна и одговорна употреба у складу са техничким и правним захтевима [5].

4. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ПРИМЕЊЕНИХ МЕТОДА ОБРАДЕ ПОДАТАКА

У савременим методама обраде података, нарочито у анализи облака тачака и 3Д моделовању, кључне технике обухватају аутоматску класификацију и екстракцију података. Облак тачака (енг. *point cloud*) представља структуру података која описује тродимензионалну геометрију простора и састоји се од скупа тачака са координатама (*X, Y, Z*). Поред координата, ове тачке могу садржати и додатне информације као што су боја, интензитет рефлектоване светлости и нормале површина.

Облаци тачака добијају се помоћу различитих сензора, као што су *LiDAR, RGB-D* камере или мобилни телефони са дубинским камерама. Стандардни формат за складиштење података из *LiDAR* скенирања је *LAS* (енгл. *Log ASCII Standard*), који садржи координате сваке појединачне тачке забележене током скенирања. Основне методе обраде облака тачака обухватају сегментацију и тродимензионалну класификацију. Сегментација може бити надзирана, где се користе унапред означени подаци за обуку, или ненадзирана, где се тачке групишу на основу својих геометријских или спектралних карактеристика. Класификација се користи за сврставање тачака у категорије као што су вегетација, зграде или тло. Први корак у процесу класификације обично подразумева издвајање тачака које припадају површи терена, што директно утиче на прецизност свих даљих анализа.

У савременим приступима, машинско и дубоко учење играју све значајнију улогу. Користе се различите технике као што су подржане векторске машине (*SVM*) и неуронске мреже. Посебно се истичу методе дубоког учења због способности да обраде велике количине података, иако захтевају значајне рачунарске ресурсе и често су изазовне за интерпретацију [6], [7].

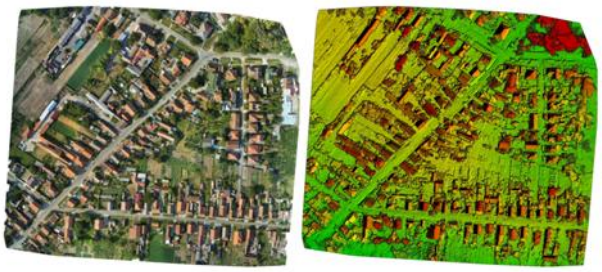
5. Примењена софтверска решења: Софтверско решење *Bentley MicroStation V8i.*

Софтверски пакет *MicroStation V8i*, који је развила компанија *Bentley Systems, Inc*., представља напредно *CAD* окружење намењено за 3Д моделирање, техничко документовање и визуелизацију. *MicroStation* је посебно погодан за рад са великим количинама просторних података, укључујући векторске елементе, растерске слике и облаке тачака. Пружа значајне могућности за анализу и визуелну интерпретацију различитих типова података. Основни формат који *MicroStation* користи је *DGN*, али се подаци лако могу извозити у друге стандардне *CAD/GIS* формате као што су *DWG, DXF*, и *KML*. MicroStation такође подржава директан рад са подацима из *LiDAR* сензора, што га чини погодним за напредну обраду 3Д простора. Могућности извоза модела у 2Д и 3Д форматима су веома разноврсне и прилагођене различитим корисничким потребама.

Terrasolid софтвер: *Terrasolid* је софтверска компанија која развија алате за обраду података добијених ласерским скенирањем, као што су *TerraScan*, *TerraModeler*, и *TerraPhoto*. Ови алати се интегришу са *MicroStation* платформом и омогућавају напредну обраду података добијених из *LiDAR* скенирања. *TerraScan* је основни модул за управљање облацима тачака и подржава аутоматску класификацију тачака. *TerraMatch* побољшава тачност података упоређивањем тачака из суседних скенираних трака. *TerraSurvey* управља подацима са терена као што су тоталне станице и *GNSS* пријемници. *TerraScan* је кључни софтвер у пакету *Terrasolid* и служи за управљање и обраду облака тачака добијених *LiDAR* технологијом. Овај алат нуди опције за аутоматску класификацију тачака, као и напредне алате за визуелизацију и обраду података. Основне функције *TerraModeler* и *TerraPhoto*: Са *TerraModeler*-ом могуће је креирати и едитовати површинске моделе у *TIN* формату на основу података добијених *LiDAR*-ом. Овај софтвер такође омогућава визуелизацију површина као бојене и осенчене моделе, као и креирање текстурних модела уз помоћ слика које се учитавају у *TerraPhoto* [8].

6. ПРАКТИЧНИ ПРИМЕР

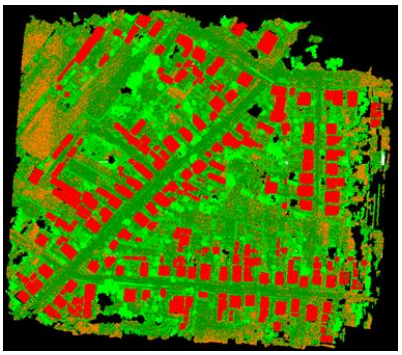
На тест подручју примењена је аутоматска екстракција кровова из облака тачака. За снимање је коришћена беспилотна летелица *Anafi Parrot,* са висином лета од 52*m*, обухваћено је подручје површине 12.36*ha*. Обрада података извршена је у *Pix4Dmapper Pro* софтверу, при чему су израђени ортофото снимак и дигитални модел површине *(DSM)*. За прецизно георефернцирање, постављено је 8 контролних тачака, чиме је постигнута *RMS* грешка од 0,048*m*. Лет је изведен са 80% преклапања слика, што је омогућило високу тачност снимања и прецизно креирање 3Д модела терена и објеката.



Слика 2. *Ортофото снимак и одговарајући дигитални модел површине (DSM).*

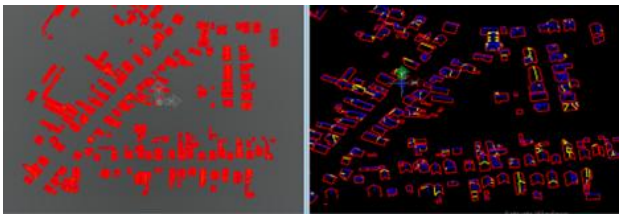
6.1. Излазни подаци и модели

Након обраде података, добијени облак тачака је уведен у *Bentley MicroStation*, где је започета класификација тачака и издвајање релевантних објеката, као што су кровови. Након покретања макроа (аутоматизована скрипта која користи *VBA* језик за програмирање) у софтверу *TerraScan*, извршена је аутоматска класификација тачака у облаку тачака, које су подељене у класе као што су земљиште, различите врсте вегетације, зграде и ниски делови терена. Након овог процеса, приступљено је ручној корекцији тачака које нису правилно класификоване, нарочито оних које су припадале зградама али су погрешно сврстане као вегетација или земљиште. Користећи алатке као што су "*Classify by class*" и "*Classify Above Line*", погрешне тачке су пребачене у одговарајуће класе, што је омогућило успешну корекцију и припрему облака тачака за даљу обраду.



Слика 3. *Крајњи резултат класификације облака тачака.*

Користећи алате за аутоматску векторизацију и анализу података добијених *UAV* фотограметријом, извршена је аутоматска екстракција кровова објеката. Са функцијом *Vectorize Buildings* у *TerraScan*-у, екстракција је омогућила прецизно креирање *3*Д модела на основу дефинисаних параметара и опција. Процес је обухватао селекцију одговарајућих класа објеката, постављање параметара за размаке и толеранције, као и дефинисање минималних детаља и површина за векторизацију. Након креирања модела кровова, примењене су полуаутоматске методе за додатну прецизност, попут конструисања полигона и креирања *3*Д модела зграда. За осигурање тачности, коришћени су и алати за ручну корекцију модела. Ови процеси омогућавају прецизно моделирање кровова, што је од кључног значаја за даље анализе и визуализације.



Слика 4. *Приказ полигона екстрахованих кровова објеката*

7. ЗАКЉУЧАК

Овај рад истиче значај напредних технологија у геодезији, посебно ласерског скенирања и фотограметрије, које су постале кључне за прецизно прикупљање и обраду геопросторних података. Употреба беспилотних летелица значајно унапређује тачност геодетских мапа и модела омогућавајући прикупљање података из различитих углова и у тешким условима. Један од најважнијих налаза овог истраживања је да квалитет коначних резултата значајно зависи од прецизности класификације података. У случајевима када је класификација била тачна, резултати су били високог квалитета, док су сложени кровови и густи слојеви вегетације представљали изазове који су угрожавали прецизност класификације, што је довело до смањене тачности модела и излазних података. Закључено је да, упркос напредовању технологије, тачност резултата и даље у великој мери зависи од квалитета класификације и сложености објеката. Напредак у технологијама и софтверским решењима доприноси прецизнијем прикупљању и обради података, али су потребна даља истраживања и развој како би се превазишли изазови и побољшао квалитет резултата у сложеним условима.

8. ЛИТЕРАТУРА

[1] Aziz M. Реферат из геодезије, мај 2019. "Принцип рада електронских даљиномера - 2. Тотална станица са кратким осврtом на оптичке даљиномере."

[2] Батиловић, М. (2024): Интегрисани системи премера: Беспилотне летелице. Факултет техничких наука, Нови Сад. Доступно на: http://geodezija.ftn.uns.ac.rs. Приступљено 20. Августа 2024.

[3] *Parrot*, Доступно на: https://www.parrot.com/en/drones/anafi. Приступљено 21. Август 2024.

[4] Дејан С. *dronografija*. Унутар света дронова: технологија која лебди у ваздуху. Доступно на: https://www.dronografija.com. Приступљено 21. Августа 2024.
[5] Правилник о беспилотним ваздухопловима, (у Београду, 23. децембра 2019. године.). Доступно на: https://cad.gov.rs. Приступљено 21. Август 2024.
[6] esri. *What is a LAS dataset. Available at*: https://desktop.arcgis.com. Приступљено 23. Август 2024.
[7] Бродић, Н. Д. (2023). Семантичка сегментација облака тачака добијеног ласерским скенирањем из ваздуха коришћењем метода машинског учења. Докторска дисертација, Доступно на: https://uvidok.rcub.bg.ac.rs/. Приступљено 23. Август 2024.
[8] *Bentley Systems. MicroStation*. Доступно на:https://www.bentley.com. Приступљено 23. Август 2024.

Кратка биографија:



Емилија Ристић рођена је у Лесковцу 1997. године. Основне академске студије на Факултету техничких наука, студијски програм Геодезија и геоматика, уписала је 2016. године, а дипломирала 2020. године. Исте године уписује и мастер студије на истом студијском програму.
Контакт: emilijaa.j97@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 528
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35KG02Mihalji

Идентификација грубих грешака у геодетским мерењима применом различитих метода

Outlier Detection in Geodetic Measurements Using Different Methods

Ченге Михаљи, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ГЕОДЕЗИЈА И ГЕОИНФОРМАТИКА

Кратак садржај – *У раду је обрађена област идентификације грубих грешака у геодетским мрежама, са посебним освртом на методу FSME. Након теоријског приказа основа Гаус-Марковљевог модела посредног изравнања, као и класичних и робусних метода откривања грубих грешака представљен је концепт FSME методе. Ова метода омогућава директну идентификацију грубих грешака током процеса изравнања путем проширења модела увођењем додатних непознатих параметара.*

Практични део рада обухвата примену FSME методе на примеру једнодимензионалне геодетске мреже, и упоређивање методе са класичном и робусном методом ради упоредне анализе добијених резултата.

Кључне речи: *FSME метода, откривања грубих грешака, нивелманска мрежа*

Abstract – *This thesis examines the identification of outliers in geodetic networks, with special emphasis on the FSME method. After a brief theoretical overview of the Gauss–Markov model of indirect adjustment and the classical and robust approaches to outlier detection, their limitations are highlighted, particularly in cases involving multiple or weak outlier. The concept of the FSME method is presented, in which the adjustment model is extended with additional parameters to allow direct detection of outliers during the adjustment process.*

The practical part of the paper includes the application of the FSME method to a one-dimensional geodetic network and its comparison with classical and robust methods in order to perform a comparative analysis of the obtained results.

Keywords: *FSME method, detection of outliers, leveling network*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био Доц. др Мехмед Батиловић

1. УВОД

Услед различитих фактора, као што су атмосферски услови, несавршености инструмената или грешке оператера, опажања у геодетским мрежама могу бити оптерећена грубим грешкама. Оне могу довести до нетачних резултата, па је њихово откривање и елиминација неопходна за поуздану анализу. У пракси се често сусрећу скупови података који садрже оваква одступања, што може значајно утицати на тачност изравнања и отежати правилну интерпретацију резултата.

Конвенционални тестови за откривање грубих грешака, засновани су на методи најмањих квадрата. Међутим, уколико је у скупу опажања садржано више грубих грешака или једна груба грешку мањег интензитета, овај метод престаје да буде оптималан.

Робусне методе представљају природно проширење класичних метода. За разлику од методе најмањих квадрата, робусне методе су далеко мање осетљиве на одступања од претпоставки модела, штавише оне се у извесној мери одупиру утицају грубих грешака.

Уведена је нова метода за откривање грубих грешака у геодетским мрежама, позната као *Forward-Search Model Error* (FSME). За разлику од класичних метода, које се ослањају на анализу резидуала у стандардном Гаус–Марковљевом моделу, FSME уводи проширени модел у коме се грубе грешке третирају као посебни параметри. На тај начин се омогућава њихова директна идентификација током процеса изравнања. Основна предност FSME методе огледа се у томе што успешно превазилази ограничења класичних тестова за детекцију грубих грешака, посебно у ситуацијама када је у опажањима истовремено присутно више грубих грешака, као и у случајевима када су грубе грешке малог интензитета.

Фокус овог рада је на анализи значаја ефикасне идентификације грубих грешака у геодетским мрежама.

2. МЕТОДЕ ОТКРИВАЊА ГРУБИХ ГРЕШАКА

2.1. Конвенционалне методе идентификације грубих грешака

Конвенционалне методе идентификације грубих грешака базиране су на методи најмањих квадрата и локалним статистичким тестовима [2]. Када је мерење

$\boldsymbol{l_i}$ оптерећено грубом грешком $\boldsymbol{\delta_i}$, тестирају се следеће хипотезе:

$$\mathrm{H_0}: \mathrm{E}(\delta_\mathrm{i}) = 0 \text{ против } \mathrm{H_A}: \mathrm{E}(\delta_\mathrm{i}) \neq 0. \quad (1)$$

Тестирање хипотеза (1) врши се применом *Data snooping* теста. Код *Data snooping* теста тест статистика се формира на следећи начин [1], [2]:

$$w_i = |v_i| / \sigma_0 \sqrt{q_{v_i v_i}} \sim N(0,1), \quad (2)$$

где је $\boldsymbol{v_i}$ поправка $\boldsymbol{i}$-тог опажања, $\boldsymbol{\sigma_0}$ *a priori* стандардна девијација, $\boldsymbol{q_{v_i v_i}}$ $\boldsymbol{i}$-ти дијагонални елемент кофакторске матрице поправака $\mathbf{Q_{\hat{v}}}$ и $\boldsymbol{N}$ стандардизована нормална расподела. Уколико је $\boldsymbol{w_i > N_{1-\alpha/2}}$, нулта хипотеза $\boldsymbol{H_0}$ се одбацује, а $\boldsymbol{i}$-то опажање се проглашава опажањем са грубом грешком. За ниво значајности $\boldsymbol{\alpha}$ обично се усваја вредност 0.001.

2.2. Робусне методе идентификације грубих грешака

Робусне методе представљају природно проширење класичних метода. Добро је познато да је метода најмањих квадрата веома осетљива на одступања од претпоставки модела и да шири ефекте грубих грешака на поправке свих опажања. За разлику од методе најмањих квадрата, робусне методе су далеко мање осетљиве на одступања од претпоставки модела, штавише оне се у извесној мери одупиру утицају грубих грешака [1].

Робусне методе идентификације грубих грешака заснивају се на робусном изравнању геодетске мреже, где се за потребе решавања функционалног модела формулише оптимизациони услов робусне оцене:

$$\rho(\mathbf{v}) = min \leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} \rho(v_i) = min, \quad (3)$$

при чему је $\rho(\cdot)$ било која функција циља из класе робусних М-оцена. Утицајна функција може се написати као $\boldsymbol{\psi}(\mathbf{v}) = \mathbf{W}\mathbf{v}$, јер је $\mathbf{W} = \boldsymbol{w}(\mathbf{v}) = \boldsymbol{\psi}(\mathbf{v})/\mathbf{v}$. До се решења може доћи применом итеративне методе најмањих квадрата:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{x}}^{(k)} &= -(\mathrm{A}^\mathrm{T}\boldsymbol{W}^{(k)}\boldsymbol{A})^{-1}\mathrm{A}^\mathrm{T}\boldsymbol{W}^{(k)}\boldsymbol{f} \\ \boldsymbol{W}^{(k)} &= \boldsymbol{P_l}\boldsymbol{W}^{(k-1)} \\ \boldsymbol{v}^{(k)} &= \mathrm{A}\hat{\boldsymbol{x}}^{(k)} + \boldsymbol{f} \end{aligned} \quad (4)$$

где је $\mathbf{P_l}$ матрица тежина мерених величина, $\mathbf{W^{(k-1)}} = \boldsymbol{diag}(\dots, \boldsymbol{w_i^{(k-1)}}, \dots)$ матрица робусних тежина и $\boldsymbol{k}$ број итерација [1]. У првом итеративном кораку ($\boldsymbol{k} = \mathbf{1}$) матрица робусних тежина $\mathbf{W}$ узима се као јединична матрица. У наредним итерацијама робусне тежине $\boldsymbol{w_i^{(k-1)}}$ формирају се помоћу одговарајуће функције тежина, која за Л1 норму је следећа [1]:

$$w_i = 1/|v_i|, \quad (5)$$

Итеративни процес (4) врши се све док разлике између вектора поправака из текуће и претходне итерације $\left|\mathbf{v^{(k)}} - \mathbf{v^{(k-1)}}\right|$ не буду мање од усвојене вредности толеранције $\boldsymbol{\gamma}$. Принцип откривања грубих грешака заснива се на поређењу оцењених поправака опажања из робусног изравнања са критичном вредношћу $\mathbf{3}\boldsymbol{\sigma_0}$. Када је оцењена вредност поправке опажања из последње итерације већа од критичне вредности, сматра се да је опажање оптерећено грубом грешком [1], [2].

2.3. *Forward-search model error* - FSME метода

Класичне и робусне методе идентификације грубих грешака у геодетским мрежама углавном се ослањају на анализу поправака у оквиру стандардног Гаус–Марковљевог модела. Иако могу бити ефикасне у случају једне грубе грешке, њихова примена у случају присуства више грубих грешака истовремено није оптимална, што често доводи до ниске поузданости резултата. Као одговор на ова ограничења, предложен је нови приступ познат као *FSME* метода [3]. Основна идеја ове методе јесте увођење проширеног модела у коме се грубе грешке третирају као посебни параметри. Овај принцип омогућава њихову директну идентификацију у процесу изравнања и обезбеђује већу поузданост у односу на класичне методе.

Метода FSME се заснива на Гаус-Марковљев моделу која се проширује вектором $\boldsymbol{\epsilon}$ димензије $\boldsymbol{u}\,\mathbf{x}\,\mathbf{1}$, који представља додатне непознате параметре, као и дизајн матрицом М димензије $\boldsymbol{n}\,\mathbf{x}\,\boldsymbol{u}$ [3]:

$$\boldsymbol{l} + \boldsymbol{v} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{M}] \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\boldsymbol{\epsilon}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\boldsymbol{C}_{ll} = \sigma^2 \mathbf{P}^{-1} = \sigma^2 \boldsymbol{Q}_{ll}, \quad (7)$$

где је варијанса $\boldsymbol{\sigma^2}$ јединична тежина проширеног модела, а вектор $\boldsymbol{\epsilon}$ садржи грубе грешке. Ако је сама груба грешка Δ_j присутна у опажању $\boldsymbol{l}_\mathrm{j}$, тада се дефинише $\boldsymbol{\epsilon} = \Delta_\mathrm{j}$ и $\mathrm{M} = \mathrm{e_j}$, где је $\mathrm{e_j} = [\mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{1}, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}]$ за $\mathrm{j} = \mathbf{1} \dots \boldsymbol{n}$ (j-ти члан вектора $\mathrm{e_j}$ добија вредност 1). За j-то опажање са матрицом $\mathbf{A} = [\mathbf{A_1}, \dots, \mathbf{A_j}, \dots]^\mathbf{T}$, једначина опажања гласи [3]:

$$\boldsymbol{l_j} + \boldsymbol{v_j} = \mathbf{A_j^T}\hat{\mathbf{x}} + \hat{\Delta}_\mathrm{j}, \quad (8)$$

где је $\mathbf{A_j^T}$ j-ти ред матрице А, који одговара j-том опажању, а за преостала опажања важи $\boldsymbol{l_k} + \boldsymbol{v_k} = \mathbf{A_k^T}\hat{\mathbf{x}}, (\mathbf{k} = \mathbf{1}, \mathbf{2}, \dots, \mathbf{n}), \mathbf{k} \neq \mathbf{j}$. Уколико грубе грешке постоје у опажањима, вектор $\boldsymbol{\epsilon}$ и матрица $\mathbf{M}$ се редефинишу на следећи начин:

$$\boldsymbol{\epsilon} = |\hat{\Delta}_\mathrm{j}, \hat{\Delta}_{(\mathrm{j}+1)}, \dots, \hat{\Delta}_\mathrm{t}|^T, \quad (9)$$

$$\mathbf{M} = |e_j, e_{(j+1)}, \dots, e_t|^T. \quad (10)$$

Алтернативна хипотеза, у случају присуства грубих грешака, има следећи облик:

$$H_0: E(\boldsymbol{l}) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} \text{ против } H_a: E(\boldsymbol{l}) = [\mathbf{A} \quad \mathbf{M}]\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{x}}\\ \hat{\boldsymbol{\epsilon}}\end{bmatrix}. \quad (11)$$

За правилно дефинисање алтернативне хипотезе потребно је испитати све могуће комбинације потенцијално оптерећених опажања. Све потенцијалне алтернативне хипотезе C_b^n, где је n број опажања, а b број потенцијалних грубих грешака, разматрају се у кораку детекције. Прво се у моделу претпоставља да је по једно опажање непознато. Додатне непознате вредности у моделу, добијају се поновним записивањем редова за свако опажање у матрици коефицијената, итеративно. Матрица дизајна може се формирати тако што се у модел укључи једна додатна димензија као непозната [3]:

$$\mathrm{A}_{C_1^n}^{1,1} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{M}] = \left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & -1 & 1\\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array}\right],$$
$$\mathrm{A}_{C_1^n}^{1,2} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{M}] = \left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1\\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array}\right], \quad (12)$$

где је $\mathrm{A}^{b,i}$ матрица коефицијената за $b = 1, \dots, f/2$ и $i = 1, \dots, n$.

Приликом рачунања грешке модела редови додатног вектора се итеративно преписују за свако опажање, а одговарајуће опажање се моделује као непозната величина, користећи кораке израчунавања дате у наставку [3].

Након израчунавања кофакторске матрице, добија се вектор непознатих параметара:

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{xx}}^{\mathbf{b}} = (\mathbf{A}^{\mathbf{b}^{\mathbf{T}}}\mathbf{P}\mathbf{A}^{\mathbf{b}})^{+} \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{\mathbf{b}} = (\mathbf{A}^{\mathbf{b}^{\mathbf{T}}}\mathbf{P}\mathbf{A}^{\mathbf{b}})^{+}\mathbf{A}^{\mathbf{b}^{\mathbf{T}}} \quad (14)$$

Да би се одредило опажање које је оптерећено грубом грешком, неопходно је пронаћи опажање које даје вредност најмање варијансе. Корак израчунавања поправака је следећи:

$$\boldsymbol{v}^b = \mathbf{A}^{\mathrm{b}}\hat{\mathbf{x}}^{\mathbf{b}} - \mathbf{l}. \quad (15)$$

A posteriori варијанса се израчунава као:

$$(s^b)^2 = \mathbf{v}^{\mathrm{b}^{\mathrm{T}}}\mathbf{P}\mathbf{v}^{\mathbf{b}}/\boldsymbol{f}^b \quad (16)$$

Након тога следи одређивање опажања са минималном варијансом:

$$j = min(s^b)^2. \quad (17)$$

Након што је релевантно опажање одређено, тест статистика се израчунава на следећи начин:

$$T = \hat{\Delta}_j/(s_0\sqrt{q_{jj}}). \quad (18)$$

За сваку додатну непознату променљиву рачуна се јединично тежинска *a posteriori* варијанса:

$$\hat{s}^2 = \frac{\boldsymbol{v^T P v}}{n-u_k},\ i=1\dots n, \quad (19)$$

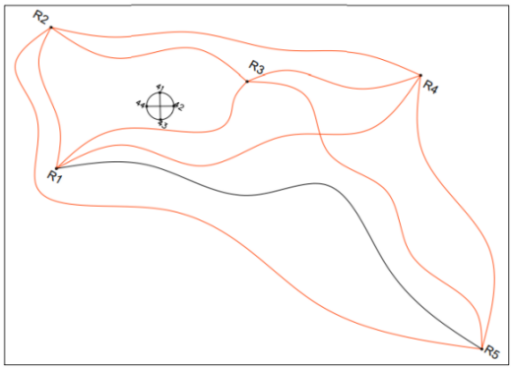
где $u_{\text{к}} = u + 1$ представља број непознатих параметара. Број елемената у скупу *a posteriori* варијанси појављује се као C_1^n. Идентификује се опажање чија је процењена вредности варијансе минимална $\min\{\hat{s}_i^2\}$, након чега се одговарајућа непозната величина за то опажање пореди са критичном вредношћу. Када је $\min\{\hat{s}_i^2\} = \hat{s}_k^2$, апсолутна вредност T се пореди са *t*-тестом. Ако је $|T| \geq t_{f-1,1-\alpha}$, H_0 хипотеза се одбацује, а *k*-то опажање се идентификује као груба грешка. У случају да се алтернативна хипотеза одбаци, поступак се завршава. Након што се изврши процена одбацивања H_0 или H_{A} хипотезе, доноси се одлука о поновном писању модела, где се непознате проширују са по два опажања за сваку C_2^n комбинацију. Матрица коефицијената се поново пише за сваку комбинацију C_2^n [3]:

$$\mathrm{A}_{C_2^n}^{2,1} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{M}] = \left[\begin{array}{cccc|cc} 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0\\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right],$$
$$\mathrm{A}_{C_1^n}^{1,2} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{M}] = \left[\begin{array}{cccc|cc} 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0\\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right], \quad (20)$$

Важно је напоменути да се све комбинације узимају у обзир независно од претходног резултата. Овај поступак се понавља за све комбинације са три или више опажања, све док се не размотре све могуће комбинације потенцијално оптерећених опажања. Вектор који одговара опажањима са најмањом варијансом, израчунатом за сваку комбинацију, пореди се са критичном вредношћу. Ако бар једна од релевантних непознатих вредности не прелази критичну вредност, алтернативна хипотеза се одбацује, и опажања означена у претходном кораку (тј. при последњем одбацивању H_0) се прихватају као грубе грешке [3].

3. НУМЕРИЧКИ ПРИМЕР

За потребе експерименталних истраживања у оквиру овог рада конципирана је једнодимензионална геодетска мрежа која се састоји од 9 репера. Скица геодетске мреже приказана је на слици 1.



Слика 1. Скица једнодимензионалне геодетске мреже

У мрежи су симулирана мерења од 18 висинских разлика са случајним грешкама мерења која следе нормалну расподелу са средњом вредношћу нула и стандардном девијацијом $\boldsymbol{\sigma}$ = 1 mm/km. Приближне висине репера и вредности висинских разлика приказани су у табелама 1 и 2. Будући да је у питању слободна геодетска мрежа, дефект датума геодетске мреже износи 1, број непознатих параметара је 9, а број степени слободе 10.

Табела 1. Приближне висине репера

Репер	$\boldsymbol{H}$ **[m]**
1	100.0000
2	101.3395
3	100.7282
4	100.5073
5	100.4244
41	101.1423
42	101.1078
43	101.1101
44	101.1075

Табела 2. Резултати мерења

Редни број мерења	**Од**	**До**	$\boldsymbol{S}$ $\boldsymbol{[km]}$	$\boldsymbol{\Delta h_i}$ **[m]**
1	1	2	0.064	1.33963
2	1	3	0.113	0.72818
3	1	4	0.182	0.50698
4	2	3	0.107	-0.61148
5	2	4	0.184	-0.83251
6	2	5	0.309	-0.91483
7	3	4	0.077	-0.22094
8	3	5	0.215	-0.30401
9	4	5	0.14	-0.08295
10	5	1	0.236	-0.4246
11	2	41	0.065	-0.19713
12	41	3	0.048	-0.41416
13	2	42	0.073	-0.23168
14	42	3	0.042	-0.37965
15	3	43	0.067	0.38194
16	43	1	0.058	-1.11016
17	1	44	0.053	1.10756
18	44	2	0.061	0.23195

Извршена је упоредна анализа добијених резултата применом FSME методе, *Data Snooping* теста и робусне Л1 норме, са циљем процене предности и ограничења FSME методе у односу на класичне методе откривања грубих грешака. У оквиру анализе сваке наведене методе разматрана су три случаја, која се међусобно разликују по интензитету уведених грубих грешака. У сва три разматрана случаја на друго и пето мерење је уведена груба грешка. У првом случају, наведена мерења садрже грешку интензитета $\boldsymbol{3\sigma_0}$, где је $\boldsymbol{\sigma_0 = 1}$ mm/km. У другом случају интензитет грешке износи $\boldsymbol{6\sigma_0}$, док у трећем случају износи $\boldsymbol{12\sigma_0}$ што омогућава сагледавање понашања метода у условима слабо, средње и јако изражених интензитета грубих грешака.

Табела 3. Упоредни резултати идентификације грубих грешака

Метода откривања грубих грешака	**Груба грешка интензитета $3\sigma_0$**		**Груба грешка интензитета $6\sigma_0$**		**Груба грешка интензитета $12\sigma_0$**	
	Друго мерење	Пето перење	Друго мерење	Пето перење	Друго мерење	Пето перење
Data Snooping	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Робусна Л1 норма	✗	✗	✓	✓	✓	✓
FSME	✓	✓	✓	✓	✓	✓

На основу табеле 3 може се закључити да је применом методе *Data Snooping* успешно извршена идентификација грубих грешака у разматраним случајевима. Иако њена ефикасност зависи од интензитета грешке и статистичких претпоставки теста, ова метода показује способност да поуздано идентификује грубе грешке у скупу опажања.

С друге стране, робусна Л1 норма постиже слабије резултате. Иако је у теорији отпорнија на одступања у поређењу са класичним методама, у разматраном примеру није успела да идентификује све присутне грубе грешке. Метода бележи успех само у случајевима грешака средњег и већег интензитета, док грешке мањег интензитета остају недетектоване.

FSME метода успешно идентификује грубе грешке свих разматраних интензитета, односно грешке интензитета $\mathbf{3\sigma_0}, \mathbf{6\sigma_0}$ и $\mathbf{12\sigma_0}$. На основу тога може се закључити да FSME метода даје поузданије резултате у идентификацији грубих грешака од робусне Л1 норме, јер омогућава откривање одступања у опажањима ниског, средњег и високог интензитета.

4. ЗАКЉУЧАК

Циљ истраживања био је да се испита ефикасност различитих метода идентификације грубих грешака у геодетским мрежама, са фокусом на FSME методу. У ту сврху спроведен је експеримент који је обухватио симулацију нивелманске мреже уз систематско увођење грубих грешака различитих интензитета.

Сагледавајући добијене резултате, може се закључити да FSME метода и *Data Snooping* тест представљају поуздане методе за идентификацију грубих грешака у геодетским мрежама. Ове методе обезбеђују стабилне и прецизне резултате за све разматране интензитете грубих грешака. За разлику од робусне Л1 норме, чија се ефикасност смањује код грешака мањег интензитета, FSME метода и *Data Snooping* тест омогућавају поуздано откривање и грубих грешака малих интензитета.

На основу резултата из анализиране литературе [3], може се уочити да FSME метода показује високу поузданост у идентификацији грубих грешака чак и у случајевима ограничене редундансе и сложенијих конфигурација мреже. Њена предност посебно долази до изражаја у случајевима када је присутно више грубих грешака истовремено и код геодетских мрежа са мањим степеном редундансе. Ово чини методу поузданијим избором у односу на конвенционалне и робусне методе.

Ови резултати имају практичан значај, будући да у реалним условима геодетских мерења грубе грешке често нису велике и јасно уочљиве. Примена FSME методе може допринети повећању ефикасности идентификације грубих грешака у мерењима, као и смањењу ризика од коришћења мерења која садрже грубе грешке у процесу изравнања геодетских мрежа.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] Батиловић, М. (2020). Робусна оцена деформација у слободним геодетским мрежама применом еволутивних оптимизационих алгоритама (Докторска дисертација). Нови Сад: Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.

[2] Batilović, M., Sušić, Z., Marković, M., Vujinović, M., Nikolić, G., & Ninkov, T. (2018). The efficiency of different outlier detection approaches in geodetic networks: case study for Pobednik statue. *Geodetski Vestnik, 62*(02), 293–305.

[3] Durdağ, U. M. (2024). Minimum-variance-based outlier detection method using forward-search model error in geodetic networks. *Geoscientific Model Development, 17*(6), 2187–2196.

[4] Сушић, З., Нинков, Т., Батиловић, М., Булатовић, В., Сабадош, И., & Петковић, М. (2016). Примена геометријске анализе деформационих мерења *у праћењу геодинамичких процеса*. Нови Сад: Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.

[5] Марковић, М. (2018). Метода одређивања деформација грађевинских структура применом фибер оптичких сензора (Докторска дисертација). Нови Сад: Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду.

[6] Wang, J., Chen, X., Shi, C., & Liu, J. (2023). Robust M-estimation-based ICKF for GNSS outlier mitigation in GNSS/SINS navigation applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.*

[7] Erdogan, B., Hekimoğlu, S., Durdağ, U. M., & Öcalan, T. (2014). Empirical estimation of the power of test in outlier detection problem. *Studia Geophysica et Geodaetica, 58*(2), 262–279.

[8] Hekimoğlu, S., & Koch, K. R. (1999). How can reliability of the test for outliers be measured? *Allgemeine Vermessungsnachrichten, 106*(11–12), 423–431.

[9] Hekimoğlu, S., Erdogan, B., & Butterworth, S. (2010). Increasing the efficacy of the conventional deformation analysis methods: An alternative strategy. *Journal of Surveying Engineering, 136*(1), 3–12.

[10] Hekimoğlu, S., Erdogan, B., Soycan, M., & Durdağ, U. M. (2011). A univariate approach for detecting outliers in geodetic networks. *Journal of Surveying Engineering, 137*(1), 1–10.

Кратка биографија:



Ченге Михаљи рођена је у Сенти 2000. год. Завршила је средњу техничку школу у Ади, након чега 2019. год. уписује Факултет техничких наука у области геодезије и геоматике. Дипломски рад одбранила је 2023. год. док је мастер рад одбранила 2025. год.
Контакт: csenge2905@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 528
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35KG03Mitrovic

Визуализација геопросторних и статистичких података коришћењем програмског језика *R*

Visualization of Geospatial and Statistical Data Using the R Programming Language

Михајло Митровић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ГЕОДЕЗИЈА И ГЕОИНФОРМАТИКА

Кратак садржај – *У оквиру мастер рада анализирана је употреба програмског језика у примени над геопросторним подацима у циљу визуализације. Анализом су обухваћени: програмски језик R, програмско окружење RStudio и геопросторни подаци који се односе на територију Републике Србије.*
Кључне речи: *визуализација, статистика, анализа, геопросторни подаци, R програмски језик*

Abstract – *The master thesis is about analysis of the programming language and its application to geospatial data for the purpose of visualization. The analzsis includes the R programming language, integrated development environment RStudio and geospatial data related to the territory of the Republic of Serbia.*

Keywords: *visualization, statistic, analysis, geospatial data, R programming language*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је проф. др Душан Јовановић

1. УВОД

У савременом дигиталном добу подаци су извор од којих настају информације које се даље анализирају и на основу којих се доносе одлуке од локалних до глобалних размера. С обзиром на то да постоје различите класификације података, једној припадају и геопросторни подаци, који заузимају посебно место јер се на основу њих ствара и просторна димензија у анализи. На основу геопросторних података могу се анализирати кретања у простору, а ако геопросторним подацима додамо и временску димензију могуће је пратити одређене појаве како у простору, тако и током одређеног временског периода. Циљ рада је да се истражи и представи примена *R* програмског језика у визуализацији геопросторних података, односно података који имају геопросторни карактер, са фокусом на практичне аспекте обраде, анализе и приказа просторних информација путем различитих *R* библиотека.

Поред наведеног, рад има за циљ да покаже изазове са којима се корисници могу сусрети при раду са геопросторним подацима. У оквиру рада биће анализирани реални скупови података који укључују статистичке показатеље распоређене по територијалним јединицама, који се визуализују кроз разне типове картографских приказа. Овом приликом визуализација се односила на статички приказ, интерактивни приказ и приказ у виду анимације.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

2.1. Визуализација

Визуализација представља процес трансформације података у визуални облик како би се олакшало њихово разумевање. Визуализација омогућава да се велики скупови података приказују на начин да буде лакши за препознавање образаца уколико они постоје. Визуализација просторних података, укључује информације о њиховој локацији, дистрибуцији и својствима (просторним и непросторним). Подаци који се обрађују за форму визуелне перцепције могу се односити на почетне и завршне резултате истраживачких анализа. Текстуални, статистички или просторни подаци могу се визуелизовати као једнодимензионални, дводимензионални, тродимензионални и вишедимензионални, укључујући анимацију, у односу на врсту и намену истраживања и коришћења. Визуално, класификовани подаци кроз табеле или представљени графиконима и дијаграмима не дају просторну дистрибуцију феномена који се проучава. То омогућава карта [1].

У смислу сврхе за које се визуализују подаци, визуализација може бити презентационог и истраживачког карактера.

Разлике између визуализација за презентацију и визуализација за истраживање леже и у форми и у пракси. Визуализација за потребе презентације је генерално статична и креира се да би се сумирале информације које треба представити. Са друге стране визуализација за потребе истраживања користи се за тражење резултата и треба да буде брза и информативна, а не спора и прецизна. Она није намењена за презентацију, тако да детаљне легенде и натписи нису потребни. Једна визуализација за потребе презентације биће намењена потенцијално хиљадама читалаца, док ће се креирати хиљаде визуализација за потребе истраживања података једног аналитичара [2].

2.2. Геопросторни подаци

Геопросторни подаци представљају темељ савремене картографије, географских информаци-оних система (ГИС) и бројних апликација које се ослањају на просторну анализу. Они описују објекте, појаве и процесе на Земљиној површини заједно са њиховим географским положајем. Другим речима, сваки геопросторни податак садржи две кључне компоненте: атрибутне информације (шта је објекат) и просторне информације (где се објекат налази).

Упркос богатству великих и разноврсних извора просторних података, просторни подаци могу бити и даље тешки за проналажење, тешки за коришћење или нелако доступни. Ове препреке ограничавају поновну употребу података и њихов потенцијални утицај. Ови изазови су препознати и довели су до развоја принципа за управљање подацима под називом „пронађиви, приступачни, интероперабилни и поново употребљиви“ (*FAIR*). Да би се максимизирала њихова вредност, подаци треба да буду *FAIR* (енгл. *Findable, Accessible, Interoperable and Reusable*) [3].

2.3. Координатни системи

Координатни системи су један од најважнијих чинилаца које треба узети у обзир при анализи геопросторних података. Просторни подаци су слични у односу на друге врсте података, али такође укључују нумеричке информације које омогућавају позиционирање на Земљи. Ови бројеви су део координатног система који обезбеђује референтни оквир за податке за лоцирање објеката на површини Земље, за поравнање података у односу на друге податке, за вршење просторно тачне анализе, за додавање и уређивање података и за креирање мапа.

Координатни референтни системи могу се идентификовати на различите начине. Тренутно најчешћи начини су: идентификатор *EPSG* (енгл. *European Petroleum Survey Group*) и потпунији *WKT2* (енгл. „*well-known text*“) дефинисан од стране *OGC* (енгл. *Open Geospatial Consortium*) и транспонован у *ISO* 19162 (енгл. *International Organization for Standardization 19162*) [4].

2.4. *R* програмски језик и *RStudio* интегрисано развојно окружење

R пружа свестран и моћан скуп алата за кориснике свих нивоа вештина, што га чини правим избором ако је потребно врхунско решење за анализе података. *R* има све што је потребно за унапређење анализе података, без обзира на ниво искуства [5].

RStudio је интегрисано развојно окружење (*IDE*) за *R* (слика 1) и *Python*. Садржи конзолу, едитор за истицање синтаксе који подржава директно извршавање кода и алате за цртање, историју, отклањање грешака и управљање радним простором. *RStudio* је доступан у издањима отвореног кода и комерцијалним издањима и ради на десктоп рачунарима (*Windows*, *Mac* и *Linux*) [6].



Слика 1: *R* и *RStudio*

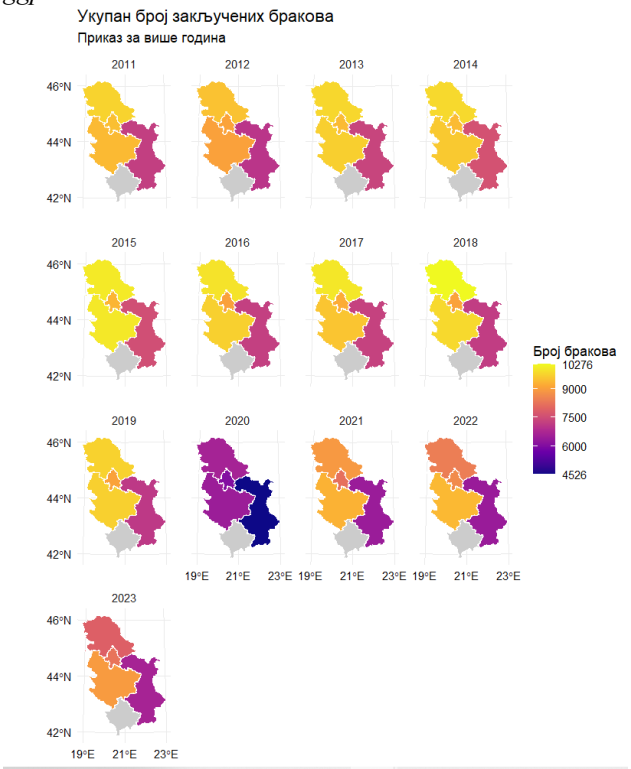
3. ПРАКТИЧНИ ПРИМЕР И ДИСКУСИЈА

Практични део се састојао из неколико делова:

- Претрага и преузимање *shp* фајлова који садрже границе административних јединица са портала Републичког геодетско завода;
- Претрага и преузимање извора података у *csv* формату са портала Републичког завода за статистику, који се односе на подручја из *shp* фајлова;
- Инсталација *R* програмског језика и *RStudio* програмског окружења;
- Писање и покретање кода у *RStudio* програмском окружењу.

3.1. Статички приказ

Слика испод (слика 2) је резултат визуализације укупног броја закључених бракова за сваку годину од 2011. године до 2023. године коришћењем пакета *ggplot2*.



Слика 2: Визуализација - статички приказ

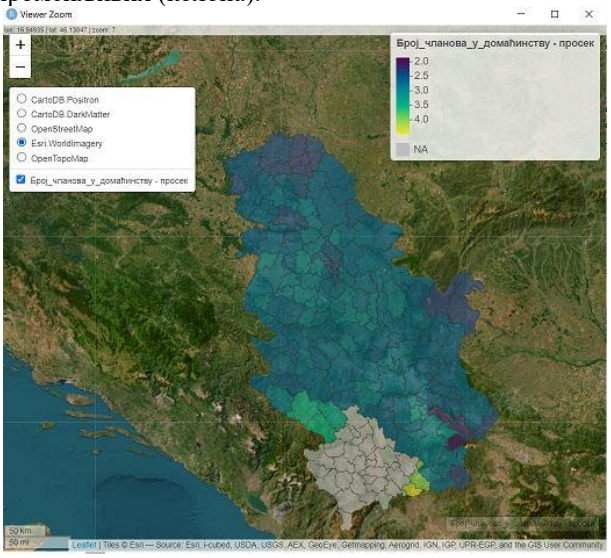
Изворни *csv* фајл садржи 1248 обсервација и 14 варијабли. У овом случају се ради о статичком приказу, што значи да нема опција које пружају анимиране или интерактивне мапе. Визуализација садржи назив, поднаслов, географску мрежу, легенду и ближе описује податке на основу године и територијалне јединице на коју се односи приказ. Садржај ове визуализације мора се описати кодом, јер се не подразумева, као у следећем подпоглављу.

Пошто су подаци приказани имајући у виду временску и просторну димензију они се могу анализирати с аспекта временске одреднице и просторне јединице. На основу ове визуализације лако се види да је више закључених бракова било у регионима Војводине, Београда и Западне Србије и Шумадије у односу на регион Јужне и Источне Србије, а с обзиром на то да

портал Републичког Завода за Статистику као коришћен извор података не садржи податке о броју бракова за регион Косова и Метохије, регион је приказан сивом бојом.
Оно што се још види јесте пораст закључених бракова од 2015. године до 2018. године, у односу на период од 2011. године до 2014. године, а од 2019. године до 2023. године је броја закључених бракова у опадању. Оно што се посебно примећује јесте знатно нижи број закључених бракова у 2020. години. „Зашто је број закључених бракова у 2020. години знатно нижи у односу на било коју годину?“ јесте питање које се поставља на основу овакве визуализације. Сада можемо кренути у потрагу за одговорима и тражити их у различитим друштвеним, политичким, економским, здравственим и другим сферама живота. С обзиром на то да је у 2020. години избила пандемија корона вирусом и да је за собом донела одређене мере које су се примењивале у циљу заштите становништва, у великој мери се може рећи да је пандемија узрок мањег броја закључених бракова, који након те године није достигао бројеве из година пре пандемије. Још једна ствар на коју указује ова визуализација, јесте мањи број склопљених бракова у региону Јужне и Источне Србије за сваку годину у односу на друге регионе, што може да укаже на мањи број становника у том региону. Коришћени пакети су: *sf, readr, dplyr, ggplot2.*

3.2. Интерактивни приказ

Визуализација на слици испод (слика 3) је резултат *mapview* пакета, који се користи за ефикасан и једноставан интерактивни приказ геопросторних података. У овом случају подаци у изворном *csv* фајлу су организовани у 5298 обсервација (редова) и 14 променљивих (колона).



Слика 3: Визуализација - интерактивни приказ

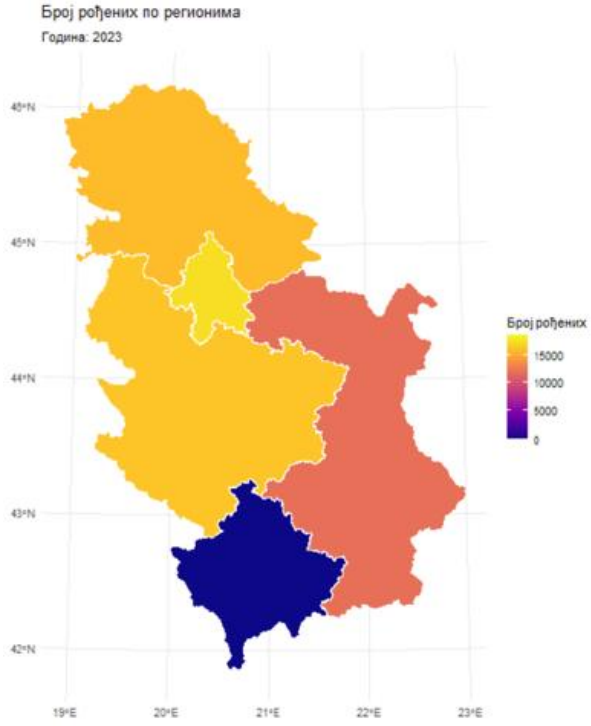
Предност визуализације помоћу овог пакета је што нема потребе за неким додатним подешавањима. Приказ овакве мапе не захтева пуно времена у смислу времена које је потребно да се мапа прикаже од тренутка покретања кода. На слици изнад се види палета у виду избора различитих слојева на којима се приказује мапа, што говори о једном делу интерактивности коју нуди. Поред наведеног постоје опције за увеличавање и умањење приказа, додавање легенде, размерника, мапу је могуће померати и увећати на жељено место, као и очитавати географске ширине и дужине преласком мишем на одређену локацију, аутоматски избор палете боја и интерактивност на начин да преласком мишем преко територију општине даје неку вредност, у овом случају је то просечан број чланова у домаћинству за 2022 годину. У табели испод (табела 1) дати су називи колона и вредности које се односе на те колоне за општину са називом Град Нови Сад. Табела (табела 1) је идентична табели која се добија у виду искачућег прозора при клику мишем на то подручје, што је још један облик интерактивности. Једном речју овакав начин приказа не тражи пуно, а даје много. Коришћени пакети су: *sf, readr, dplyr, mapview* и *stringi*.

Табела 1: Искачући прозор

Матични број општине	89010
Општина	Град Нови Сад
Година	2022
Индикатор	Просечан број чланова домаћинства
просек	2.336198186
fillColor	#1D4D85
mvFeaturedId	108

3.3. Приказ у виду анимације

На слици испод (слика 4) приказан је резултат једног дела визуализације у виду анимације, то јест приказ који се односи на укупан број рођених по регионима 2023. године.



Слика 4: Визуализација у виду анимације

Изворни *csv* фајл се садржи 312 обсервација и 14 варијабли. Анимација се састоји од 13 слика које се редом приказују тако што се приказ укупног број рођених претходне године замењује приказом укупног броја рођених наредне године и тако све у круг од 2011.

године до 2023. године, без могућности интеракције у смислу заустављања анимације у неком тренутку. Анимација је сачувана у *.GIF* формату и као таква је погодна за дељење путем апликација за размену порука. Садржај визуализације је пропраћен географском мрежом са назначеним вредностима географских координата (географска ширина и географска дужина), насловом (Број рођених по регионима), поднасловом (Година: 2011-2023), размерником у боји који остаје исти приликом промене приказа у анимацији и називом који ближе упућује на шта се размерник односи и на основу ког реалног параметра се мења приказ у анимацији (Број рођених). Коришћени пакети су: *sf, readr, dplyr, ggplot2, gganimate* и *viridis.*

4. ЗАКЉУЧАК

На основу приказаног, јасно се уочавају резултати у виду могућности да један или више великих скупова података учинимо „малим“ , односно да извршимо скалирање података, а да се при томе не изгуби њихова вредност и суштина онога што представљају. Очигледно је да је то могуће постићи трансформацијом сирових или сређених табеларних података у слике, у овом случају у мапе. Са тако креираних визуализација изведена су и шира запажања. На тај начин подацима није умањена вредност, већ су визуализацијом подаци добили на вредности.

Из претходно наведеног следи једно тумачење визуализације као трансформације података у мапе. Обрадом конкретних тема, односно тема из реалног окружења и доношењем закључака на основу обраде и упоређивања у смислу временске и просторне димензије у оквиру једне теме или идентификовање очигледних узрочно-последичних веза између две или више тема, представља још један пример како су геопросторни подаци добили на вредности применом *R* програмског језика у обради и визуализацији.

У неким случајевима код се извршава брже, а у неким случајевима спорије. Када су као извор коришћени геометријски слојеви директно са сервера, у случају интерактивних приказа, извршавање кода је било брже у односу на извршавање кода када су геопросторни подаци (подаци и гометрије) били складиштени на рачунару. Брзина извршавања кода зависила је и од тога о каквом типу визуализације је реч. Тако се у случају визуализације статичке мапе код извршавао брже него у случају визуализације у виду анимације, за коју је било потребно око 15 минута да се изврши након покретања кода. Дакле, најбрже се извршавао код у случају интерактивних мапа када је коришћена библиотека *mapview*, затим када је визуализација била статичког типа и најспорије се код извршавао када је визуализација била у виду анимације.

С аспекта могућих праваца даљег рада над подацима или примене у другим сферама живота, могу се разматрати други алати, друге библиотеке у оквиру *R* програмског језика, тродимензионалне визуализације, примена математичких теорија из области статистике и вероватноће, а касније и визуализација тако добијених резултата, а посебно примена вештачке интелигенције.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] J. M. Јовановић, T. M. Јанковић, M. Марковић, M. Стојановић и M. Симић, „Визуелизација просторних података од значаја за развој туризма у заштићеним подручјима,“ у *Дванаести научно - стручни скуп са међународним учешћем Планска и нормативна заштита простора и животне средине, Београд, октобар 2023.*, Београд, 2023.

[2] C.-h. Chen, W. Hardle и A. Unwin, Handbook of Data Visualization, Берлин, Хајделберг: Springer-Verlag, 2008.

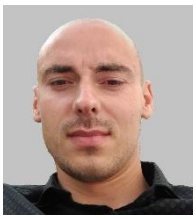
[3] P. Moraga и L. Baker, „rspatialdata: a collection of data sources and tutorials on downloading and visualising spatial data using R,“ *F1000 Research,* т. 11, 13 Новембар 2024.

[4] P. Maesen и E. Salingros, „Introduction to Reproducible Geospatial Analysis and Figures in R: A Tutorial Article,“ *Data,* т. 9, p. 58, 20 Април 2024.

[5] J. Roa, „Install R and Rstudio: why R rocks,“ 02 Март 2023, https://www.hertiecodingclub.com/learn/rstudio/Install-r-studio/ [Последњи приступ 13 Август 2025].

[6] „The most trusted IDE for open source data science,“ https://posit.co/products/open-source/rstudio/?sid=1 [Последњи приступ 13 Август 2025].

Кратка биографија:



Михајло Митровић рођен је у Нишу 1996. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Геодезија и геоинформатика одбранио је 2026.год.

Контакт: mitrovic.mihajlo711@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 502.51
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35MO01Gluvakovic

Компарација физичко-хемијских параметара реке Дунав у Немачкој, Аустрији, Мађарској и Србији

The Comparison of Physico-Chemical Parameters of the River Danube in Germany, Austria, Hungary, and Serbia

Никола Глуваковић, Маја Турк Секулић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ИНЖЕЊЕРСТВО ТРЕТМАНА И ЗАШТИТЕ ВОДА

Кратак садржај – *Рад приказује резултате истраживања које је обухватало анализу и компарацију физичко-хемијских параметара у узорцима воде реке Дунав, прикупљених на одређеним локалитетима у Савезној Републици Немачкој и у Републикама Аустрији, Мађарској и Србији у лето 2024. године. Рад је написан у оквиру међународног пројекта „Стрим – звуци Дунава: Интердисциплинарна едукација о животној средини".*

Кључне речи: *Дунав, загађење површинских вода, паркови природе, пројекат „ Стрим".*

Abstract – *The paper presents the results of a study that analyzed and compared physicochemical parameters in water samples from the Danube River that were collected at specific locations in the Federal Republic of Germany and the Republics of Austria, Hungary, and Serbia. The paper was written within the international project "Stream - The Sounds of the Danube: Towards an Interdisciplinary Environmental Education".*

Keywords: *Danube, surface water pollution, nature parks, The "Stream" project.*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Маја Турк Секулић, ред. проф.

1. УВОД

Реке се могу посматрати као крвни судови Земље и кључне су за развој људске цивилизације, кроз обезбеђивање свеже воде за насеља, индустрију, рибарство и транспорт. Током времена, дошло је до истовременог повећања експлоатација река за снабдевање питком водом, транспортом, производњом електричне енергије итд [1].

Истраживање у раду даће приказ метода које су коришћене за испитивање узорака и репрезентативне физичко-хемијске параметре који описују квалитет воде реке Дунав на одређеним локалитетима у поменутим државама. Основна идеја је била да разумемо колико се квалитет воде у Дунаву мења док пролази од изворишта у Савезној Републици Немачкој до Црног мора и како антропогене активности утичу на његов квалитет.

2. ЗНАЧАЈ УЗОРКОВАЊА, ОЦЕЊИВАЊЕ И МОНИТОРИНГ КВАЛИТЕТА АКВАТИЧНИХ СИСТЕМА

Сврха прикупљања репрезентативног узорка површинске воде, било са руралног или урбаног локалитета, јесте да се утврди њен квалитативни и квантитативни статус. У циљу континуалног мониторинга, узорци воде се сакупљају и анализирају више пута током недеља, месеци, година и деценија како би се прецизније утврдило како се услови у воденом телу мењају током времена [2].

У развијеним земљама, рутински се прати широки спектар (често више стотина) органских загађујућих материја, нутријената и метала, уз опсежан спектар физичких, хемијских и биолошких параметара. Посебна пажња се обраћа на кључне параметре за које је познато да имају највећи утицај на речни еколошки статус, тј. фосфате, амонијак, нитрате, pH и концентрацију раствореног кисеоника. На основу добијених података, може се утврдити да ли површинске воде испуњавају стандарде и задовољавају еколошки статус према утврђеним правилницима [3].

Постоје три врсте мониторинга површинских вода:

- надзорни;
- оперативни;
- истраживачки [4].

3. КВАЛИТЕТ ВОДЕ У РЕЧНИМ БАСЕНИМА

Квалитет површинских вода утиче на природне процесе, као и на антропогене активности. Природни фактори као што су геолошке формације, типови земљишта, климатски услови и хидролошке карактеристике природно утичу на параметре квалитета воде. Међутим, антропогене активности (урбанизација, индустријализација, рударство, пољопривреда и повећана потрошња воде) значајно доприносе деградацији површинских вода.

Примера ради, петрохемијска индустрија утиче на квалитет површинских вода испуштајући нитрате, хлориде, сулфате и нафтне деривате у реципијент. Пољопривреда утиче на квалитет површинским отицањем азота и фосфора. Антропогени фактори често делују заједно као стални извори загађења и тако нарушавају водене екосистеме и умањују употребљивост површинских вода. Редовно праћење квалитета воде у речним басенима и препознавање санитарних ризика су важни за примену одговарајућих превентивних мера ради заштите животне средине и јавног здравља [5].

4. ПРОЈЕКАТ „СТРИМ - ЗВУЦИ ДУНАВА: ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРНА ЕДУКАЦИЈА О ЖИВОТНОЈ СРЕДИНИ“

Пројекат „Стрим – звуци Дунава: Интердисциплинарна едукација о животној средини” је имао сврху да промовише свест и образовање о заштити животне средине кроз комбинацију научних и акустично-уметничких приступа. Кроз пројекат су се анализирао квалитет воде и звучни пејзаж дуж реке Дунав у Немачкој, Аустрији, Мађарској и Србији. Музика и звучни снимци су омогућили да се уоче сличности и разлике у звучном пејзажу на неколико локалитета, док узимањем узорака воде са истих су се прикупљали подаци о квалитету и загађености воде у Дунаву. Комбиновањем ова два приступа и добијених резултата, јавност у све четири поменуте земље је имала приступ подацима путем дигиталне платформе знања, омогућавајући нови приступ образовању о зашитити животне средине и подстичући људе да се ангажују ради њене заштите. Пројекат су заједно спроводили СРХ Универзитет у Хајделбергу (Немачка) у сарадњи са Универзитетом музике и уметности у Бечу (Аустрија), Универзитетом у Печују (Мађарска) и Универзитетом у Новом Саду (Србија) у периоду јул-август 2024. године [6].

5. ДУНАВ И ЊЕГОВА ИЗЛОЖЕНОСТ ЗАГАЂЕЊУ

Дунав је друга најдужа река у Европи након Волге и друга је најбогатија водом река у Европи. Од извориштa у Немачкој до Црног мора са дужином од 2826 km, Дунав пролази кроз 10 европских држава. Његов улгавном источни ток служио је као коридор за миграције и трговину и граница која је била строго чувана хиљадама година. Дунав у Србији има социјалне, економске и еколошке димензије и важан је природни водни ресурс [7].

6. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ УЗОРКОВАЊА

Физичко-хемијски парамтетри који су испитивани током истраживања ради утврђивања еколошког стања воде у Дунаву су: нитрати и нитрити, укупан фосфор, укупан хром, укупан органски угљеник (ТОС) и јони бакра, кадмијума и олова.

У Табели 1 су приказане локације узорковања воде у Немачкој. Потребно је напоменути да се дате локације налазе у немачкој савезној држави Баден-Витемберг, где се налази извориште Дунава у регији Шварцвалд (Црна шума).

Табела 1. Број прикупљених узорака по локацији и датуми узорковања у Немачкој

Број узорака	Локација	Датум
3	Тиергартен	02.07.2024
3	Гутенштајн	02.07.2024
3	Дитфурт	02.07.2024
1	Инцигкофен	02.07.2024
1	Лајц	02.07.2024
7	Фридинген	03.07.2024
2	Имендинген	03.07.2024
2	Ахквеле	03.07.2024
6	Донаушенинген	04.07.2024

У Табели 2 су приказане локације узорковање воде у Аустрији, Мађарској и Србији.

Табела 2. Број прикупљених узорака по локацији и датуми узорковања у Аустрији, Мађарској и Србији

Број узорака	Локација	Датум
1	Штајнспорнбруке (Беч, Аустрија)	03.09.2024
1	Донауштатбруке (Беч, Аустрија)	03.09.2024

1	Маријенбруке (Беч, Аустрија)	03.09.2024
1	Хајош Јатсотер (Мохач, Мађарска)	04.09.2024
1	Мохачи рев (Мохач, Мађарска)	04.09.2024
1	Ујмохачи сабадштранд (Мохач, Мађарска)	04.09.2024
1	Рибарско острво (Нови Сад, Србија)	06.09.2024
1	Данубиус – ушће канал ДТД (Нови Сад, Србија)	06.09.2024
1	Шангај (Нови Сад, Србија)	06.09.2024

Сви узорци су били посебно означени идентификационим кодовима. На свакој локацији узорковања су узете и тачне координате (географска ширина и дужина) уз помоћ апликације Гугл мепс (енг. Google Maps).

Узорци су прикупљени у стакленим флашама од 0,5 L и чувале су се у преносним фрижидерима приликом транспорта до лабораторија за испитивање. Узорци воде из Немачке су лабораторијски анализирани у акредитованој лабораторији граду Хајделбергу, док су узорци из Аустрије, Мађарске и Србије анализирани у Новом Саду, у Институту за јавно здравље Војводине.

Приликом испитивања у лабораторији, методе које су се користиле за анализу узорака су следеће:

- волуметријска;
- спектрофотометријска;
- ICP-MS;
- пламено-фотометријска;
- рачунска;
- оксидација на високој температури.

7. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Резултати анализираних елемената варирају од локације до локације у ове четири државе и њихова концентрација умногоме зависи од развијености индустрије, пољопривредних активности и количине третираних отпадних вода. Пошто су узорци у Немачкој прикупљени на локацијама у руралном подручју где нема значајних индустријских постројења и једини значајни извор загађења представљају пољопривреда и канализација. Међутим, у Савезној Републици Немачкој је обавезна пракса да се све отпадне воде, било да потичу из привредних објеката или приватних домаћинстава, морају третирати пре испуштања у реципијент. Иако је пракса слична у Аустрији, ситуација је другачија јер се локације узорковања налазе у урбаној средини, тј. у граду Бечу. Анализе су показале за нијансу веће концентрације хрома, кадмијума, бакра и олова услед већих количина отпадних вода из домаћинстава и индустријских постројења. Такође, вредно спомињања јесте и речни саобраћај. У односу на прве-две земље, узорци воде из Дунава у Мађарској и Србији имају веће концентрације хрома, кадмијума, бакра и олова, што је последица мањег третмана отпадних вода из домаћинстава и привредних објеката, а овај проблем је поготово изражен у Србији. Нема великих разлика у концентрацијама фосфора, нитрата и нитрита у узорцима из све четири земље, а концентрације TOC-а се повећавају низводно од локација узорковања у Немачкој.

Резултати испитиваних елемената из узорака из све четири земље су приказани на графицима 1-4. Сваки график представља резултате анализе узорака за сваку земљу.

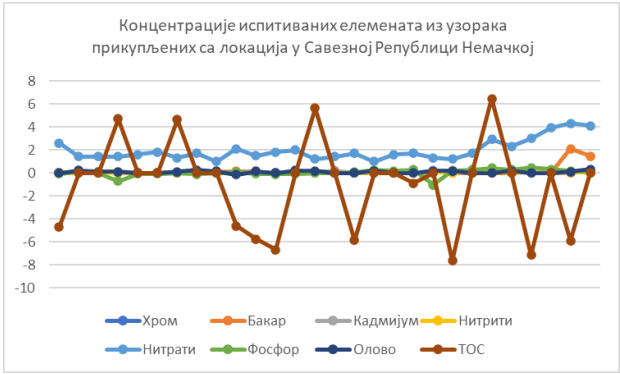


График 1. Измерене концентрације (mg/L) испитиваних елемената из узорака прикупљених са локација у Савезној Републици Немачкој



График 2. Измерене концентрације (mg/L) испитиваних елемената из узорака прикупљених са локација у Републици Аустрији

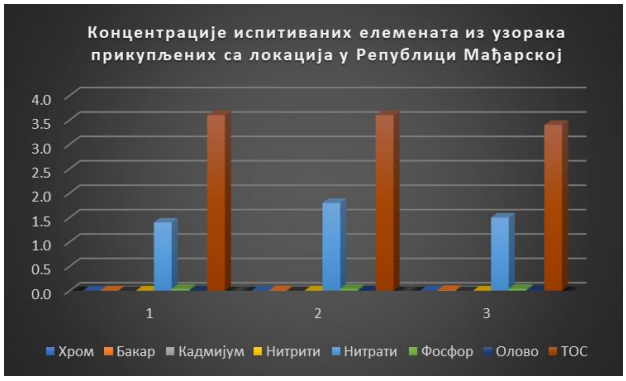


График 3. Измерене концентрације (mg/L) испитиваних елемената из узорака прикупљених са локација у Републици Мађарској



График 4. Измерене концентрације (mg/L) испитиваних елемената из узорака прикупљених са локација у Републици Србији

8. ЗАКЉУЧАК

Важност мониторинга квалитета површинских вода представља темељ за ефикасно вођење политике заштите животне средине, заштите водних ресурса и заштиту јавног здравља. Да би политика заштите животне средине и водних ресурса била успешна, потребно је предузети значајне кораке како би се избегле негативне последице по јавно здравље и здравље локалних екосистема. Током истраживања, Немачка и Аустрија су се показале као најбоље државе-представнице са најбољом и најефикаснијом политиком и праксом заштите животне средине, иако постоји значајна разлика у одабиру локација за узорковања, тј. локације узорковању у Немачкој се налазе у руралном подручју, док се у Аустрији локације налазе у градској средини, што резултира другачији квалитет површинских вода. Са друге стране, Мађарска у овом делу заостаје за Немачком и Аустријом, док Србија заостаје за све три земље, што је резултат због недовољне развијене свести о заштити животне средине, примене закона и недовољно развијене инфраструктуре за третман отпадних вода. Чинећи податке о квалитету површинских вода јавно доступним, појединци могу доносити одговарајуће одлуке како би допринели заштити јавног здравља и учествовали у напорима за заштиту реке Дунав.

9. ЛИТЕРАТУРА

[1] Zuo, Q.; Hao, M.; Zhang, Z.; Jiang, L. Assessment of the Happy River Index as an Integrated Index of River Health and Human Well-Being: A Case Study of the Yellow River, China. Water 2020, 12, 3064. https://doi.org/10.3390/w12113064

[2] Rickert, B.; Chorus, I.; Schmoll, O. Protecting surface water for health: Identifying, assessing and managing drinking water quality risks in surface-water catchments. World Health Organization, 2016, ISBN 9789241510554

[3] Bowes, M.; Sinha, R.; Joshi, H.; Read, D. River Water Quality Monitoring. Emerging Science For Sustainable Water Resource Management

[4] https://institutjjs.hr/monitoring/vrste-monitoringa/ (приступљено у септембру 2025.)

[5] Milijašević Joksimović, D.; Jakovljević, D.; Jojić Glavonjić, T. Evaluation of Water Quality in the Tamiš River in Serbia Using the Water Pollution Index: Key Pollutants and Their Sources. Water 2025, 17, 1024. https://doi.org/10.3390/w17071024

[6] https://democratia-aqua.org/stream-project/ (приступљено у септембру 2025.)

[7] Sommerwerk, N.; Hein, T.; Schneider-Jacoby, M.; Baumgartner, C.; Ostojić, A.; Siber, R.; Bloesch, J.; Paunović, M.; Tockner, K. The Danube River Basin. 2009. Rivers of Europe. Academic Press. Inc.

Кратка биографија:



Никола Глуваковић рођен је у Новом Саду 1996. године. Мастер студије из области Инжењерства заштите животне средине, студијског програма Инжењерство третмана заштите вода је уписао 2021. и успешно их завршио 2025.године.
Контакт:
n.gluvakovic@gmail.com



Проф. др Маја Турк Секулић је редовни професор на Факултету техничких наука из области Инжењерства заштите животне средине.
Контакт:
majaturk@uns.ac.rs

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 004:007
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35OI01Vukovic

Развој и примјена Ревит додатка за аутоматизацију БИМ процеса помоћу програмског језика C#

Development and implementation of a Revit plugin for automation BIM processes using the C#

Андреја Вуковић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ИНЖЕЊЕРСТВО ИНФОРМАЦИОНИХ СИСТЕМА

Кратак садржај – У раду је представљена улога БИМ-а (енгл. *Building Information Modeling*) у савременом грађевинарству и значај аутоматизације процеса помоћу Аутодеск Ревит (енгл. *Autodesk Revit*) додатка. Описан је развој и имплементација додатка ДИБС42 Хајв (енгл. *DIBS42 Hive*) помоћу Ц# програмског језика, као и резултати анкете спроведене ради анализе примјене и задовољства корисника постојећим Ревит додацима.
Кључне речи: *Аутодеск Ревит, БИМ, додатак, аутоматизација процеса*

Abstract – *In this paper, the role of BIM in modern construction and the importance of process automation using an Autodesk Revit plugin are presented. The development and implementation of the DIBS42 Hive plugin using C# programming language are described, along with the results of a survey conducted to analyze the application and user satisfaction with existing Revit plugins.*

Keywords: *Autodesk Revit, BIM, plugin, process automation*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Марко Арсеновић, доцент, ред. проф.

1. УВОД

У савременом грађевинарству и архитектонском пројектовању, дигитализација процеса и примјена информационог модела, као што је БИМ, постали су кључни за повећање ефикасности, прецизности и контроле током пројектовања и извођења радних задатака [1].
Данас све више компанија тежи ка томе да аутоматизује процеса рада, односно уводе у своје пословање нове софтвере, принципе рада и дигиталне алате који омогућавају бољу организацију, ефикасније управљање и смањење људске грешке. Када је ријеч о софтверима који компаније уводе, конкретно у област грађевинарства, један од водећих алата за БИМ је Аутодеск Ревит. То је алат који омогућава архитектама, инжењерима и другим стручњацима да креирају и управљају комплетним дигиталним моделима грађевинских објеката [2].
У оквиру мастер рада анализиран је развој и примјена ДИБС42 Хајв додатка кроз архитектуру, интерфејс и практичну употребу. Спроведена је анкета међу корисницима која је показала да додатак смањује ручни рад, повећава ефикасност и задовољство корисника. Рад показује како примјена програмског језика Ц# може унаприједити радне процесе, смањити оперативне трошкове и омогућити бољу фокусираност на креативне и стручне задатке.

2. ТЕОРИЈСКИ ОКВИР

Теоријски оквир овог рада пружа основу за разумијевање БИМ концепта и начина на који се подаци у грађевинарству организују, размјењују и користе током различитих фаза пројекта.
БИМ представља дигиталну репрезентацију објеката која обједињује геометријске и семантичке податке, омогућавајући аутоматизацију процеса као што су процјена количина, провјера колизије, генерисање документације и аналитичке симулације. Захваљујући интеграцији више дисциплина у јединствен модел, БИМ доприноси бољој координацији, смањењу грешака и ефикаснијем управљању животним циклусом објекта. Иако примјена БИМ-а доноси значајне користи у погледу тачности, продуктивности и одрживости, његово увођење прате изазови као што су високи трошкови, потреба за обуком и прилагођавање посојећих радних процеса [1]. Један од најзаступљенијих БИМ алата је Аутодеск Ревит, који омогућава параметарско 3Д (енгл. *Three-dimensional*) моделовање архитектонских, конструктивних и МЕП (енгл. *Mechanical, Electrical and Plumbing engineering*) система у јединственом окружењу [3]. Ревит обезбјеђује аутоматско ажурирање документације, подршку за колаборативни рад и интероперабилност са другим БИМ и ЦАД (енгл. *Computer-Aided Design*) форматима. Пружа развијене алате за архитектонско, конструкционо и МЕП пројектовање, омогућавајући рад како индивидуално, тако и у тимовима. Подржава параметарске компоненте, које омогућавају постављање зидова, врата и прозора у отвореном, графичком систему богатом параметрима, намијењеном моделовању и обликовању фирме.

Захваљујући параметарским компонентама и централизованој бази података, омогућена је досљедност модела и смањен ризик од недосљедности у пројектној документацији. Поред бројних предности, важно је истакнути и то да иако постоје додаци који олакшавају рад у оквиру овог окружења, понекад је тешко прилагодити софтвер специфичним радним процесима. Такође, иницијални или текући трошак за лиценцу може бити значајан за појединце или мање фирме [2].

Аутоматизација процеса у оквиру Ревит окружења омогућена је кроз употребу програмског језика Ц#, који је интегрисан са .НЕТ платформом и подржава развој прилагођених додатака путем Ревит АПИ-ја. Ц# је објектно-оријентисан, статички типизован језик који омогућава развој поузданих и проширивих апликација. Његова примјена у БИМ окружењу омогућава елиминацију рутинских задатака, повећање ефикасности и смањење могућности грешака, што представља основу за развој алата као што је додатак ДИБС42 Хајв, чија је примјена предмет овог рада.

3. ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ДОДАТАКА НА ПРОЦЕСЕ РАДА

У овом поглављу дат је преглед и анализа постојећих алата који се користе за аутоматизацију процеса у БИМ окружењу, као и детаљно разматрање употребе и функционалности ДИБС42 Хајв додатка. На овај начин постављен је основ за систематично поређење додатака и процјену њихове релевантности у пракси, као и за сагледавање специфичне улоге коју ДИБС42 Хајв има у унапређењу радних токова.

3.1. Анализа употребе и функционалности постојећих додатака

Анализа постојећих додатака у БИМ окружењу обухвата алате развијене за Аутодеск Ревит који омогућавају аутоматизацију понављајућих процеса. Циљ ове анализе је идентификација њихових функционалности, предности и ограничења, како би се дефинисале потребе које додатак ДИБС42 Хајв настоји задовољити.

Међу најчешће коришћеним рјешењима су *pyRevit* и *Dynamo for Revit*, који пружају велику флексибилност и могућност аутоматизације, али захтијевају додатно техничко знање и искуство у програмирању. Са друге стране, алати као што су *DiRoots Suit*s и *Ideate Explorer* фокусирани су на управљање подацима и контролу модела, док *BIM Track* омогућава колаборацију у већим тимовима, али не доприноси директно аутоматизацији пројектантских процеса [2].

Иако наведена рјешења значајно унапређују рад у Ревит окружењу, већина њих је специјализована, захтијева додатне вјештине или се ослања на више одвојених алата. Ово указује на потребу за интегрисаним и једноставним рјешењем које не захтијева програмерско знање и које обједињује кључне функционалности у оквиру једног додатка.

3.2. Анализа употребе и функционалности ДИБС42 Хајв додатка

На основу анализе постојећих алата, ДИБС42 Хајв је развијен као интегрисан и бесплатан Ревит додатак, прилагођен стварним потребама пројектантске праксе. Додатак је настао као интерно рјешење у оквиру компаније ДИБС42, са циљем аутоматизације честих и понављајућих процеса у раду електро и машинских инжењера, а касније је постао доступан и ширем кругу корисника.

Додатак је развијен у програмском језику Ц#, уз коришћење .НЕТ оквира и *MVVM* (енгл. *Model-View-ViewModel*) архитектонског обрасца, што омогућава модуларност, лако одржавање и проширење функционалности. Кориснички интерфејс је интуитиван и прилагођен корисницима без програмерског искуства.

ДИБС42 Хајв додатак се састоји од 22 алата, груписана према потребама електроинжењера, машинских инжењера и универзалних пројектантских задатака. Алати омогућавају аутоматизацију означавања елемената, генерисање електрошема, рад са МЕП елементима, управљање параметрима, стандардизацију документације и убрзање рада над већим бројем елемената. Посебно се издваја интеграција алата *Chat with Revit*, који уводи примјену вјештачке интелигенције и нови ниво интеракције са БИМ моделом [4].

ДИБС42 Хајв показује да једноставно, приступачно и бесплатно рјешење може значајно унаприједити ефикасност, прецизност и стандардизацију рада у Ревит окружењу, представљајући поуздану основу за даљи развој и примјену у пракси.

4. ДИСКУСИЈА И АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

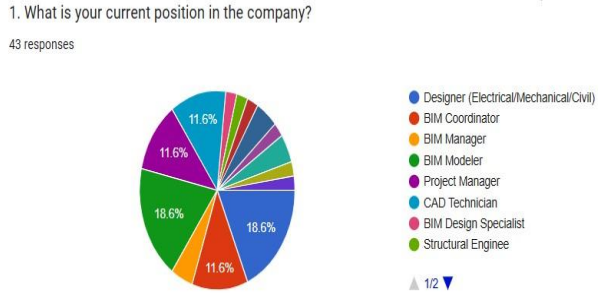
У оквиру овог рада спроведено је истраживање помоћу онлајн (енгл. *online*) анкете, чији је циљ био да се испита начин коришћења Аутодеск Ревит-а, БИМ радних токова и Ревит додатака, са посебним фокусом на употребу додатка ДИБС42 Хајв. Данас, анкетно истраживање представља најпопуларнији и најједноставнији метод истраживања. Омогућава ефикасно прикупљање података од већег броја стручњака у кратком временском периоду, уз минимално оптерећење за испитанике.

Анкета је спроведена на енглеском језику како би била доступна широј професионалној публици. Спроведена је унутар компаније ДИБС42, међу електро, машинским и грађевинским инжењерима, и јавно преко Линкедин (енгл. *LinkedIn*) мреже, како би се прикупила мишљења од већег броја стручњака из области грађевинарства, машинства, електротехнике, па чак и архитектуре. Анкета се састоји од различитих типова питања, како би се прикупили и квантитативни и квалитативни подаци. Типови питања обухваћени овом анкетом су:

- да/не питања,
- питања са више понуђених одговора, са дозвољеним једним одговором,
- питања са више понуђених одговора, са више могућих одговора,

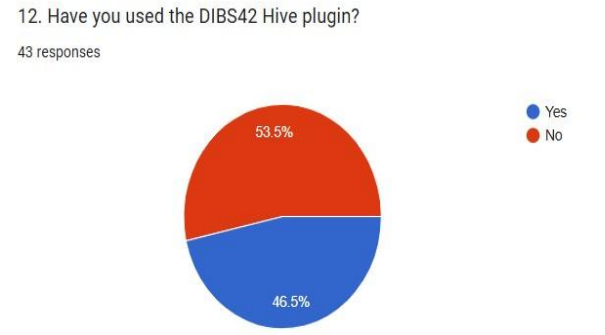
- питања са пољем слободног уноса у виду текста и
- питања са скалом оцјењивања.

У истраживању је учествовало 43 испитаника из различитих струка, укључујући грађевинарство, машинство, електротехнику и архитектуру. На основу слике 1 може се закључити да су већина испитаника дизајнери или пројект менаџери, док су остали БИМ координатори, менаџери и ЦАД техничари. По питању радног искуства, највише испитаника има између 1 и 3 године искуства, док значајан број има више од 7 година. Што се тиче искуства са БИМ-ом, већина испитаника наводи 1–3 године, али постоје и они са мање од годину дана или више од 7 година. Ови резултати указују да је група испитаника професионално релевантна и довољно упућена у БИМ процесе.



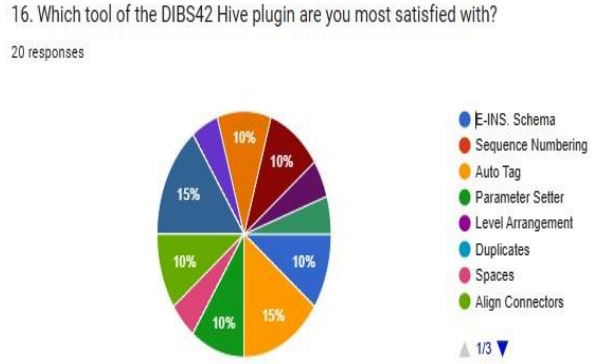
Слика 1. Визуелни приказ тренутних улога у комаији

Већина испитаника користи Аутодеск Ревит свакодневно, а познавање Ревит АПИ-ја је углавном на средњем нивоу, док дио испитаника нема претходно искуство, а значајан број има висок ниво знања. Користе различите додатке као што су *Dynamo*, *PyRevit*, *Enscape*, ДИБС42 Хајв и *BIM 360*, који омогућавају аутоматизацију рутинских задатака, управљање параметрима и визуелизацију у реалном времену. ДИБС42 Хајв додатак користи готово половина испитаника, као што је приказано на слици 2, и оцјењују додатак као веома користан за уштеду времена и олакшање рада. Такође, битино је нагласити да испитаници сматрају да додатна обука може повећати ефикасност коришћења додатка.



Слика 2. Визуелни прказ укупног броја корисника додатка

Најкорисније функције укључују аутоматизацију документације и рутинских задатака, а интерфејс додатка се сматра прегледним и једноставним за интеграцију у радне токове. Највећи проценат испитаника (по 15%) изјаснило се да су најзадовољнији алатима који подржавају аутоматско означавање елемената (енгл. *Auto Tag*) и поједностављују рад са комплексним инсталационим елементима (енгл. *Curve Jumper*). Преостали алати, приказани на слици 3, заступљени су са појединачним учешћем од 10% или мање.



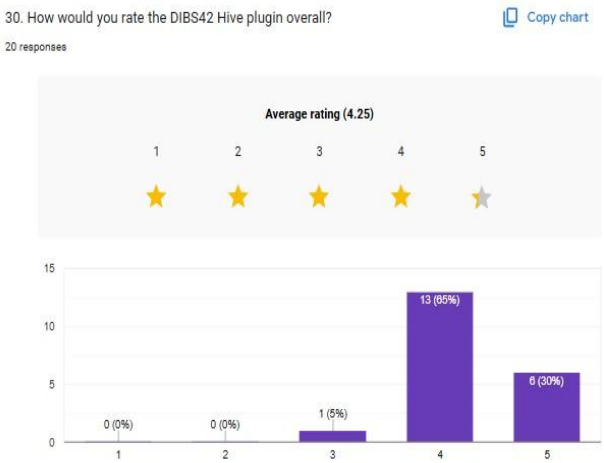
Слика 3. Визуелни приказ најчешће коришћених алата

Оваква расподјела указује да, иако ниједан од ових алата не доминира у потпуности, сви имају своју јасну и конкретну примјену у зависности од типа задатака и фазе пројектовања. Укупно посматрано, резултати указују да корисници највише цијене алате који директно убрзавају процес означавања и олакшавају рад са сложеним геометријским рјешењима.

Испитаници су предложили неколико конкретних функционалности које би жељели да се додају или унаприједе у додатку, као што су:

- боља визуелна обавјештења, односно модернији интерфејс,
- прилагођавање и аутоматизација,
- интеграција и интероперабилност и
- перформансе и рад са великим моделима.

На основу наведеног, може се закључити да се приједлози фокусирају на већу флексибилност, брже перформансе и шире могућности интеграције и аутоматизације.



Слика 4 Визуелни приказ просјечне оцјене додатка

У цјелини, резултати анкете показују да БИМ додатци, а посебно ДИБС42 Хајв, значајно побољшавају ефикасност и квалитет рада,

омогућавају аутоматизацију рутинских задатака и смањење ручног рада. Испитаници препознају вриједност додатка у свакодневном раду и сматрају да би даља едукација и унапређење функционалности додатно повећали његову корисност. Функционалност додатка испитаници су оцијенили високом просјечном оцјеном 4,25, што је приказано на слици 4, и тиме се указује на висок ниво задовољства корисника и његову практичну вриједност у свакодневном раду.

5. ЗАКЉУЧАК

У оквиру мастер рада анализирана је улога БИМ технологија у савременом грађевинарству, са фокусом на аутоматизацију радних процеса кроз развој и примјену Ревит додатка ДИБС42 Хајв.

Кроз теоријски дио рада представљени су основни концепти БИМ-а, функционалности и употреба Аутодеск Ревит-а, као и значај аутоматизације и проширивања функционалности софтвера путем програмског језика Ц#. Када је ријеч о практичном дијелу, он обухвата развој додатка и анализу његове употребне вриједности кроз истраживање међу корисницима. Резултати показују да корисници препознају додатак као алат који може допринијети уштеди времена, смањењу ручног рада и унапређењу квалитета пројектантских процеса. Анализом спроведене анкете идентификовани су кључни аспекти и потенцијални правци за даље унапређење алата, у складу са потребама и очекивањима корисника. Поред тога, указано је на одређене факторе који утичу на спремност корисника за коришћењем додатака, прије свега потреба за бољом едукацијом, јаснијим туторијалима и практичним демонстрацијама предности у односу на постојеће радне токове. Значајну улогу имају интеграција са постојећим процесима у организацији, подршка колега и менаџмента, као и техничка усклађеност са актуелним верзијама Ревит софтвера.

На основу детаљне анализе може се закључити да ДИБС42 Хајв представља поуздану основу за даљи развој и унапређење, као и да има потенцијал да значајно допринесе дигитализацији и оптимизацији радних процеса у оквиру БИМ окружења. Будући рад може бити усмјерен ка проширењу функционалности додатка, унапређењу корисничког искуства и додатној анализи његове примјене на већем узорку корисника у различитим типовима пројеката.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] E.R. Alexander. „*Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods*.“ 2019.

[2] J. L. Walid Thabet and S. „*Linking life cycle bim data to a facility management system using revit dynamo*.“ 2025. Доступно на: https://reference-global.com/article/10.2478/otmcj-2022-0001.

[3] Turk. „*Reflections on three decades of building information modeling*.“ 2025. Доступно на: https://www.mdpi.com/ 2075-5309/15/2/231.

[4] DIBS42 „*Dibs42 hive bim base gateway*.“ 2024. Доступно на: https://www.dibs42.com/revit-plugins/all-plugins.

Кратка биографија:



Андреја Вуковић рођена је у Приједору 2000. год. Завршила основне академске студије на Факултету техничких наука у Новом Саду, на департману Индустријско инжењерство и менаџмент, смјер Инжењерство информационих система. Тренутно је студент мастер студија на истом факултету и департману.

Контакт:
vukovic.andreja.pd@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, НовиСад

УДК: 007:004.056
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35OI02Ijacic

Емпиријска анализа ефикасности статичке анализе и АИ модела у детекцији плагијата програмског кода

An Empirical Study of the Effectiveness of Static Analysis and AI Models for Source Code Plagiarism Detection

Ирена Ијачић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ИНЖЕЊЕРСТВО ИНФОРМАЦИОНИХ СИСТЕМА

Кратак садржај – *Овај рад представља емпиријску анализу ефикасности статичке анализе и анализе засноване на вјештачкој интелигенцији у детекцији плагијата програмског кода. У раду је описана употреба сопственог рјешења за статичку анализу, као и избор великог језичког модела DeepSeek у облаку за потребе детекције плагијата. Рад наглашава важност развоја алата за провјеру плагијаризма. Поред тога, истичу се предности и ограничења сваке од поменутих анализа у зависности од типа измјена у коду. На основу добијених резултата предложени су правци даљег развоја, укључујући хибридни приступ који комбинује оба поменута приступа.*

Кључне речи: *детекција плагијата, анализа изворног кода, статичка анализа, АИ модели*

Abstract – *This paper presents an empirical analysis of the effectiveness of static analysis and artificial intelligence-based analysis in detecting plagiarism in source code. The study describes a custom solution for static analysis, as well as the selection of the large language model DeepSeek in the cloud for plagiarism detection purposes. The paper emphasizes the importance of developing tools for plagiarism verification. Furthermore, the advantages and limitations of each analysis method are highlighted depending on the type of modifications in the code. Based on the obtained results, directions for further development are proposed, including a hybrid approach that combines both methods.*

Keywords: *plagiarism detection, source code analysis, static analysis, artificial intelligence models*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Владимир Мандић, ванр. проф.

1. УВОД

Плагијат изворног кода постаје све већи проблем као резултат наглог раста онлајн репозиторијума и све веће доступности дигиталних докумената, што у великој мјери утиче на квалитет образовања у области рачунарства. Када се помене појам плагијата у коду не мисли се само на директно копирање туђег програма, већ често укључује и дјелимичне измјене тог кода, као што су промјене имена промјењивих, редослиједа функција или структуре програма. Овакве измјењене верзије кода представљају изазов за откривање. Претходне студије показују да плагијат обухвата читав низ стратегија за преузимања туђег кода, што укључује опсег од минималних површинских измјена до значајних прилагођавања, при чему основна идеја оригиналног програма остаје задржана. [1] Временом, истраживачи су се бавили темом провјере плагијата у коду, обрађујући различите врсте клонова који се могу јавити и развијајући одговарајуће алате који ће исте препознати. Значајан број постојећих рјешења се ослања на статичку анализу кода, гдје се комбинацијом познатих метрика врши процјена система или његових компоненти на основу њихове структуре, садржаја или документације. Поред статичке анализе, напредак у области вјештачке интелигенције омогућио је примјену АИ модела у детекцији плагијата програмског кода. Циљ овог рада је компаративна анализа метода статичке анализе и анализа заснованих на вјештачкој интелигенцији у откривању плагијата изворног кода.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ И СРОДНИ РАДОВИ

У овом поглављу представљене су теоријске основе појмова на којима се рад заснива.

2.1. Појам плагијата кода

Сам појам плагијата има више различитих дефиниција. Научници су описивали овај појам на различите начине, али увијек суштина дефиниције остаје иста, а то је да плагијат уствари представља копирање и измјену туђег кода без адекватног навођења његовог аутора.

Издвајају се четири основна типа плагијата која су посебно битни за разумијевање и детекцију плагијата кода. Типови клонова су [2]:

- Тип I: Дијелови кода су потпуно исти, осим евентуалних промјена у размацима и коментарима.
- Тип II: Структура дијелова кода је иста, али се разликују називи идентификатора, типови података, размаци и коментари.

- Тип III: Код овог типа, поред промјена у идентификаторима, називима промјењивих, типовима података и коментарима, поједини дијелови кода могу бити обрисани или измјењени, или се могу додати нови дијелови кода.
- Тип IV: Два дијела кода имају различит текст, али остварују исту функционалност.

2.2. Статичка анализа кода

Статичка анализа кода представља процес процјене система или његових компоненти на основу њихове структуре, садржаја или документације. Ова анализа пружа могућност доношења закључка о томе како се понаша сам програм, а да се тај исти програм не мора претходно извршити. Када се говори о области детекције плагијата у коду, статичка анализа пружа могућност поређења два програма у погледу њихове структуре, синтаксе и семантичких елемената, како би се утврдило да ли је код копија неког другог рада. У том случају, статичка анализа може бити изражена као комбинација више познатих метрика које ће покрити различите области провјере.

2.3. Појам вјештачке интелигенције

Постоји више различитих дефиниција за појам вјештачке интелигенције. Већина практичара се слаже око два главна циља АИ, а то су изградња интелигентне машине и сазнавање о природи интелигенције. Једна од кључних методологија вјештачке интелигенције је дубоко учење (енгл. *Deep Learning*), а дефинише се као техника која тренира вјештачке неуронске мреже на огромним скуповима података у облику обиљежених података (енгл. *labelled data*). Дубоко учење је основ за задатке великих језичких модела [3]. Неки од најпознатијих језичких модела су: GPT-3, GPT-3.5, GPT-4, BARD, DeepSeek.

2.4. Преглед постојећих истраживања

На основу извршеног прегледа релевантне литературе може се закључити да и статичке методе анализе и методе засноване на вјештачкој интелигенцији представљају ефикасна рјешења у случајевима када се плагијат налази у површинским измјенама кода. Међутим, уколико су извршене значајније измјене на нивоу логике или структуре кода, предност се даје приступима заснованим на АИ. Ови приступи у таквим условима показују већу прецизност, бољи одзив и укупно боље резултате. С друге стране, статичка анализа има предност када је ријеч о потребним рачунарским ресурсима за анализу и брзину њеног извршавања, нарочито при обради великих скупова података. Ове карактеристике чине је бољом опцијом за специфичне случајеве у којима су перформансе и скалабилност најважнији.

3. МЕТОДОЛОГИЈА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ОКВИР

У оквиру ове секције описани су кораци спроведене методологије.

3.1. Циљ истраживања и истраживачка питања

Циљ овог рада је евалуација два технолошка приступа за потребе детекције постојања плагијата у контексту провјере студентских радова. Допринос рада се огледа у компаративној анализи два различита приступа детекције на истом скупу података, што може пружити корисне податке за образовне институције и бројне развојне тимове. На основу постављеног истраживачког циља могу се формулисати следећа истраживачка питања:

1. Која метода (статичка анализа или анализа заснована на вјештачкој интелигенцији) даје прецизније резултате и већи одзив у откривању плагијата изворног кода у поређењу са познатом референтном вриједношћу?
2. Како се резултати статичке и АИ анализе разликују у случајевима када су измјене у коду површинске (на примјер промјена имена промјењивих или формата) у односу на случајеве који укључују дубље семантичке измјене (на примјер измјене у алгоритамској логици)?
3. Која метода је временски ефикаснија и једноставнија за имплементацију и примјену на великим колекцијама задатака?
4. У којој мјери су резултати сваке методе транспарентни и интерпретабилни крајњем кориснику (на примјер наставницима или истраживачима)?

Полазна претпоставка истраживања је да између статичке анализе и АИ заснованог приступа не постоје значајне разлике у ефикасности детекције плагијата, које се могу квантификовати кроз F1-score метрику.

3.2. Скуп података

За потребе истраживања коришћени су радови студената прикупљени у оквиру курса „Алгоритми и структуре података“, на смјеру Инжењерство информационих система Техничког факултета у Новом Саду. Радови се организују у сетове, тако да сваки сет садржи референтни рад, као и друге радове који служе за поређење и провјеру.
Међу поменутим радовима, издвајају се три типа примјера над којима је вршена анализа, а то су:

1. Студентски радови на исту тему - радови који се односе на исти задати алгоритам.
2. Сет контролних примјера – ови радови нису написани од стране студената, већ се ради о ауторским радовима који служе као референца (енгл. *ground truth*) јер је познато шта је оригинал, које модификације су извршене, односно о каквој врсти измјене се ради.
3. Студентски радови на различиту тему коришћени за тестирање *false positive* детекције.

3.3. Примјењене методе

Статичка анализа кода се користи као један од приступа за детекцију плагијата у коду. Циљ ове анализе јесте идентификација степена сличности између програмских кодова на основу њихове структуре, синтаксе и редослиједа операција. Иако је статичка анализа примарно усмјерена ка откривању површинских измјена у коду, комбинацијом различитих метрика могуће је креирати анализу која ће препознати и дубље измјене. Креиран је сопствени код за статистичку анализу који комбинује и рачуна више различитих метрика, а то су *Exact Match*, *Token Similarity*, Анализа структуре апстрактног синтаксног стабла (ACT), *Sequence similarity* и *Winnowing Similarity*.
За сваку од ових метрика дефинисана је тежина, као што приказане Табела 1, а коначан степен сличности добија се као тежински просјек.

Табела 1. Тежине одабраних метрика статичке анализе

Мјера	Тежина
Exact Match	0.2
Token Similarity	0.1
AST Similarity	0.2
Sequence Similarity	0.2
Winnowing Similarity	0.3

Поред статичке анализе за детекцију плагијата између програмских кодова користи се и анализа заснована на вјештачкој интелигенцији, која омогућава аутоматизовану анализу са фокусом на логику и структуру кода. Дакле, оваквом анализом се ставља фокус на препознавање сличности и у случајевима дубоких семантичких измјена, за које је потребан већи степен разумијевања програмског кода. Анализа заснована на вјештачкој интелигенцији реализована је употребом великог језичког модела. Ови модели су истренирани и научени да препознају одговарајуће обрасце у коду и на основу тога доносе закључке. За потребе овог рада одабран је DeepSeek модел у облаку и то његова верзија *deepseek-v3.1:671b-cloud*.

3.4. Метрике за процјену

Precision представља удио исправно идентификованих релевантних случајева у односу на укупан број случајева које је систем означио као релевантне. Precision мјери колико је резултат чист од лажних позитива:

$$Precision = TP/(TP + FP) \quad (1)$$

Recall представља удио исправно идентификованих релевантних случајева у односу на укупан број стварно релевантних случајева у референтном скупу. Recall показује колико система пропушта релевантних измјена:

$$Recall = TP/(TP + FN) \quad (2)$$

F1-score је хармонијска средина прецизности и обухвата (Precision и Recall), и користи се као уравнотежена метрика када је важно узети у обзир и лажне позитивне и лажне негативне резултате. Дефинисан је као:

$$F1 - score = 2 \cdot (Precision \cdot Recall)/(Precision + Recall) \quad (3)$$

Постављена је нулта хипотеза (H_0) којом се наводи да је просјечна F1-score вриједност добијена примјеном статичке анализе једнака просјечној F1-score вриједности добијеној примјеном АИ анализе, односно:

$$H_0: \mu_{F1stat} = \mu_{F1AI} \quad (4)$$

Алтернативна хипотеза (H_1) полази од супротне претпоставке, да просјечне F1-score вриједности нису једнаке, те да једна од метода показује већу ефикасност у откривању плагијата.

4. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру секције 4 приказани су резултати извршених анализа.

4.1. Резултати статичке анализе

Резултати метрика статичке анализе за свих десет сетова података приказује Табела 2. Уочава се да статичка анализа постиже максималну прецизност у свим сетовима, што указује на одсуство лажних позитивних детекција. Са друге стране, вриједности одзива се више мијењају током анализе, нарочито у случајевима дубљих семантичких измјена, што се одражава и на ниже F1-score вриједности.
Просјечно вријеме извршавања статичке анализе указује на високу временску ефикасност и стабилност извршавања.

Табела 2. Резултати статичке анализе

Статичка анализа			
Сет	Precision	Recall	F1-score
1	1	0.67	0.8
2	1	1	1
3	1	0.6	0.75
4	1	0.75	0.857
5	1	1	1
6	1	0.75	0.875
7	1	0.5	0.67
8	1	0.5	0.67
9	1	0.5	0.67
10	1	0.5	0.67

Табела 3 садржи резултате анализе засноване на АИ моделу. АИ анализа постиже високе вриједности и прецизности и одзива у готово свим сетовима података, што доводи до високих F1-score вриједности. За разлику од статичке анализе, АИ приступ задржава висок одзив и у случајевима дубљих семантичких

измјена кода. Просјечно вријеме извршавања АИ анализе значајно је веће у односу на статичку анализу.

Табела 3. Резултати анализе засноване на вјештачкој интелигенцији

АИ анализа			
Сет	Precision	Recall	F1-score
1	0.9	1	0.95
2	1	1	1
3	1	0.8	0.89
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	1	1
9	0.8	1	0.89
10	1	1	1

5. ДИСКУСИЈА

Кроз резултате спроведеног истраживања јасно се наводи да статичка анализа показује већу прецизност у поређењу са методом заснованом на вјештачкој интелигенцији. Ово указује да ова метода генерише мањи број лажно позитивних резултата, односно да је конзервативнија у означавању кода као плагираног. Са друге стране, анализа заснована на вјештачкој интелигенцији показује значајно већи одзив у односу на статичку анализу. Ови резултати указују да АИ методе успјешније идентификују већи број стварних случајева плагијата, али уз повећан ризик од лажно позитивних резултата. Статичка анализа показује већу осјетљивост на површинске измјене кода, али предност има у погледу времена извршавања, транспарентности и детерминистичности резултата. Резултати добијени овим истраживањем су у складу са постојећим научним истраживањима, уз изузетак прецизности, гдје је у овом истраживању утврђена предност статичке анализе. Примјена Wilcoxon-овог теста потврдила је постојање статистички значајне разлике у F1-score вриједностима између двије методе ($p < 0.05$), чиме се одбацује постављена нулта хипотеза.

6. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада обрађена је тема детекције плагијата између програмских кодова написаних у програмском језику C#. Резултати спроведеног истраживања показују да је статичка анализа показала предност у погледу тачности резултата и времена које је потребно за извршавање детекције, али се истовремено показала као недовољно ефикасна за детектовање дубљих измјена које не може поуздано да препозна. Супротно томе, анализа заснована на вјештачкој интелигенцији показује изузетне резултате управо у случају дубљих семантичких измјена кода. Изазови идентификовани током израде овог рада у највећој мјери односили су се на проналазак одговарајућег модела вјештачке интелигенције. Иако је област вјештачке интелигенције у процесу континуираног развоја, још увијек су присутна одређена ограничења у оквиру појединих примјена. Управо једна од таквих области јесте детекција плагијата у програмском коду, гдје постојећи модели не показују увијек задовољавајући ниво поузданости и прецизности. Додатан изазов при изради рада био је преглед постојеће научне литературе. Иако је ова тема тренутно изузетно актуелна, посебно у академским круговима гдје све већи број факултета и образовних институција укључује овакву врсту алата за провјеру студентских и ученичких радова, још увијек није написан довољан број релевантних научних радова који се баве овом проблематиком. Што се тиче доприноса спроведеног истраживања, он се прије свега огледа у развоју сопственог алгоритма за статичку анализу кода у сврху детекције плагијата, што је омогућило поређење статичке анализе и анализе засноване на вјештачкој интелигенцији кроз провјеру тачности, одзива, времена извршавања, степена транспарентности резултата, као и кроз провјеру детерминистичности спроведених анализа. Кроз поступак извођења овог истраживања, уочена су и одређена ограничења везана за постојеће АИ моделе у овој области, што оставља простор за будући рад. Правци даљег истраживања могу бити усмјерени ка развоју хибридног приступа који би комбиновао статичку анализу програмског кода и методе засноване на вјештачкој интелигенцији, како би се искористило најбоље од оба приступа.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] G. Cosma and M. Joy, “Towards a Definition of Source-Code Plagiarism,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 51, no. 2, pp. 195–200, May 2008, doi: 10.1109/TE.2007.906776.

[2] D. Rattan, R. Bhatia, and M. Singh, “Software clone detection: A systematic review,” Jul. 2013. doi: 10.1016/j.infsof.2013.01.008.

[3] B. · January, “Learning Outcomes of Classroom Research.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/358050961

Кратка биографија:



Ирена Ијачић, рођена 7. априла 2000. године у Требињу. Након завршене гимназије 2019. године уписала Факултет техничких наука, смјер Инжењерство информационих система. Основне академске студије завршила 2023. године са звањем „дипломирани инжењер информационих технологија“. **Контакт: irenaijacic17@gmail.com**

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 007:004
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35OI03Fejes

Употреба великих језичких модела у тестирању софтвера

Use of Large Language Models in Software Testing

Давид Фејеш, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ИНЖЕЊЕРСТВО ИНФОРМАЦИОНИХ СИСТЕМА

Кратак садржај – *Развој генеративне вештачке интелигенције омогућио је широку примену великих језичких модела у различитим доменима развоја софтвера. Велики језички модели се све чешће користе као подршка у фазама аутоматизације, анализе и евалуације тестова, повећавајући ефикасност тестирања. Овај рад се бави улогом и потенцијалом великих језичких модела у савременом тестирању софтвера, са посебним освртом на његове предности, ограничења и факторе који утичу на поузданост. Посебна пажња посвећена је питању поузданости и стабилности модела, што представља кључни изазов у практичној примени. Резултати указују да велики језички модели тренутно имају највећу вредност као подршка постојећим алатима и методама, док њихова пуна аутономија захтева даља истраживања.*

Кључне речи (три до пет): *велики језички модели, тестирање софтвера, аутоматизација тестирања, вештачка интелигенција*

Abstract – *The advancement of artificial intelligence has enabled the broad adaptation of large language models across various domains of software development. These models are increasingly used to support automation, analysis, and evaluation of tests, thereby improving the overall efficiency of software testing. This paper explores the role and potential of large language models in modern software testing, with particular emphasis on their advantages, limitations, and factors that affect reliability. Special attention is given to the issues of consistency and stability, which represent major challenges in real-world problems. This finding suggests that large language models currently provide the greatest value as intelligent support tools that complement existing methods, while their full autonomy in testing remains a subject of ongoing research.*

Keywords: (three to five): *large language models, software testing, test automation, artificial intelligence*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Владимир Мандић, ванр. проф.

1. УВОД

Напредак у области генеративне вештачке интелигенције последњих година значајно је утицао на домен развоја и тестирања софтвера. Велики језички модели (енгл. *Large Language Models* - LLMs) представљају највидљивији резултат тог напретка, јер поседују способност разумевања природног језика и генерисања кода који одговара логичким и контекстуалним захтевима. Њихова примена у тестирању софтвера отвара нове могућности за аутоматизацију и оптимизацију процеса који су традиционално били временски и ресурсно захтевни, доприносећи ефикаснијем откривању грешака и побољшању квалитета кода. Употребом LLM-ова могуће је аутоматски генерисати тестне случајеве, препознати недовољну покривеност кода, као и идентификовати грешке у раним фазама развоја. Ипак, поред потенцијала, јављају се и изазови који се односе на поузданост, стабилност резултата и ограничену контролу над процесом генерисања. Разумевање ових аспеката постаје кључно за безбедну и ефикасну примену LLM-ова у пракси. У овом раду је спроведен систематски преглед литературе (енгл. *Systematic Literature Review* – SLR) са циљем да се прикаже улога великих језичких модела у савременом тестирању софтвера, да се анализирају њихове најчешће области примене, користи и ограничења, као и фактори који утичу на квалитет и поузданост генерисаних тестова. Посебна пажња посвећена је параметрима конфигурације модела, попут температуре, који имају значајан утицај на стабилност и разноврсност излазних резултата. На основу идентификованих налаза, рад указује на потенцијал LLM-ова као интелигентне подршке постојећим техникама тестирања и дефинише смернице за будућа истраживања у овој области. Досадашња истраживања се углавном фокусирају на техничке аспекте примене LLM-ова при генерисању софтвера, док је систематско сагледавање њихове поузданости и стабилности резултата ретко заступљено. Управо због тога је потребно разматрање постојећих студија, како би се идентификовали трендови, уочене празнине и отворена истраживачка питања која и даље ограничавају њихову практичну примену.

2. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ

Истраживање примене великих језичких модела у тестирању софтвера последњих година бележи

значајан раст, нарочито након појаве GPT модела. Све већи број студија тежи ка испитивању потенцијала ових и других модела у области аутоматизације тестирања софтвера. У овом поглављу представљен је протокол који је примењен током прегледа литературе. Обухвата дефинисање циљева истраживања, истраживачких питања, формулисање стратегије претраге и критеријума прихватљивости и коначно процес селекције радова како би се добио коначан скуп анализираних студија.

2.1. Циљеви истраживања

Циљ овог истраживања је сагледавање улоге великих језичких модела у савременом тестирању софтвера.

2.2. Истраживачка питања

Истраживачка питања која су разматрана током прегледа литературе:

ИП1: Како и који велики језички модели се користе у тестирању софтвера?

ИП2: Које су предности и ограничења примене великих језичких модела у тестирању софтвера?

ИП3: Како различите конфигурације великих језичких модела утичу на квалитет и поузданост генерисаних резултата?

2.3. Стратегија претраге

У циљу проналажења релевантних студија, коришћене су две научне базе података, а то су *IEEE Explore* и *Scopus*. Над обе базе је спроведен напредни упит са кључним терминима као што су *software testing, large language models, test generation* као и њихови синоними.

2.4. Критеријуми селекције радова

У оквиру критеријума укључивања, обухваћени су радови који испуњавају следеће:
Рад мора бити објављен у периоду од 2022. до 2025. године, како би се обухватио скуп радова који рефлектују тренутни ниво развоја LLM-а:

- Рад је написан на енглеском језику.
- Рад мора бити објављен као емпиријска студија, експеримент, студија случаја или евалуација.
- Рад се бави применом великих језичких модела у тестирању софтвера, при чему анализира његове перформансе, користи и ограничења.

Критеријуми искључења примењени су како би се одстраниле студије које нису релевантне за истраживачки фокус:

- Рад који се бави искључиво развојем или тренирањем LLM-а без њихове примене у тестирању софтвера.
- Рад истражује употребу LLM-а у другим доменима, попут анализе кода, верификације или природне обраде језика, без директне везе са генерисањем тестова.
- Теоријски радови или прегледи без емпиријских доказа и евалуација.

2.5. Процес селекције радова

На основу дефинисаног протокола спроведен је процес селекције литературе у две фазе. Најпре је извршена иницијална претрага база научних радова где су идентификоване 44 студије. Након уклањања 6 дупликата, спроведен је преглед наслова и сажетака, након чега је елиминисано још 11 радова. Приступ 4 рада није био могућ, те су из тог разлога искључени из даље студије. Укупно је 23 рада ушло у другу фазу. Друга фаза обухвата детаљан преглед самих радова. Како у овој фази ниједан рад није одбачен, прихваћено је 23 рада, који задовољавају све критеријуме и који ће служити за даљу анализу.

2.6. Процена квалитета студија

Процена квалитета спроведена је како би се осигурала поузданост и релевантност анализираних радова. Свака студија је оцењена на основу шест критеријума који се односе на: усмереност истраживања на примену великих језичких модела у тестирању софтвера, јасноћу и релевантност циљева, прикладност примењеног истраживачког приступа, јасноћу и анализу резултата, препознавање ограничења и њихових импликација, као и допринос практичним увидима у домену тестирања.

2.7. Екстракција података

Процес екстракције података дефинисан је тако да обезбеди структуриран и упоредив скуп информација за све анализиране радове. За сваку студију издвојено је осам категорија података: тип емпиријске студије (експеримент, студија случаја или евалуација), начин примене великог језичког модела у тестирању, конкретни модели коришћени у истраживању, идентификоване предности и ограничења, вредности параметра температуре, као и практичне препоруке, закључци и предлози за будућа истраживања. Ови подаци су послужили као основа за синтезу налаза и анализу представљену у наредном поглављу.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У овом поглављу детаљно су приказани резултати анализе у односу на раније дефинисана истраживачка питања.

3.1. ИП1: Како и који велики језички модели се користе у тестирању софтвера?

Велики језички модели све више привлаче пажњу као алат за аутоматизацију и унапређење различитих фаза развоја софтвера, укључујући генерисање јединичних тестова применом приступа учења из малог броја примера (енгл. *Few-shot learning*) или додатном обуком модела [1,2]. Досадашња истраживања указују да LLM-ови могу да постигну обећавајуће резултате у домену генерисања јединичних тестова [3]. Идентификован је широк спектар коришћених LLM-ова у студијама. Резултати показују јасну доминацију модела из породице GPT [1-14], посебно верзија GPT-

3.5, GPT-3.5 Turbo и GPT-4. Велику заступљеност имају специјализовани модели за разумевање кода, Codex [2,13,15-18] и StarCoder [2,13], док су модели отвореног кода, LlaMA 2 [3,4,19] и Mistral-7B [19,20], заступљени у мањем броју студија. У две студије модели нису јасно дефинисани [21,22]. У литератури се још помињу и BLOOM [13], CodeGen2 [13], CodeGPT [23], DeepSeek [11], InCoder [13], LlaMA [15], PALM-2 [4], StarCoder [13] и StarCoderBase [13].

Резултати показују да се велики језички модели најчешће користе за генерисање јединичних тестова, док су примене у домен-специфичном тестирању и репродукцији грешака у порасту. У домен-специфичним студијама модели се прилагођавају одређеним индустриским системима, попут контролних [7] и телекомуникационих [19] апликација, како би генерисали тестове за специфичан домен, док у развоју вођеним понашањем (енгл. *Behavior-Driven Development* – BDD) тестирање прихватљивости показује потенцијал LLM-ова у генерисању сценарија блиских корисничким захтевима. Табела 1 приказује дистрибуцију студија по начину употребе великих језичких модела у тестирању софтвера.

Табела 1. Дистрибуција радова по употреби

Категорија	**Број студија**
Јединични тестови	9
Домен-специфично тестирање	5
Репродукција грешака	4
Побољшање и исправка тестова	3
БДД тестови	1
АПИ тестирање	1

Велики језички модели се у тестирању софтвера углавном користе као помоћни алати за аутоматизацију постојећих процеса, при чему доминирају модели из GPT породице, док се отворена решења углавном примењују у експерименталним радовима, што указује да је област у фази технолошког сазревања. Ова доминација комерцијалних модела указује на ограничену доступност ресурса за истраживање и на зависност тренутних и будућих пројеката од затворених платформи, што представља методолошко ограничење за репродуктивност резултата.

3.2. ИП2: Које су предности и ограничења примене великих језичких модела у тестирању софтвера?

На основу налаза из свих анализираних студија, предности и ограничења примене великих језичких модела у тестирању софтвера могу се посматрати као две комплементарне димензије, а то су ефикасност и поузданост. Истраживања показују да су најчешће користи повезане са повећањем покривености кода [2,3,8-12,14-17,21], убрзањем тестних циклуса [1,18-20] и смањењем мануелног напора [4-7,13,23], чиме се значајно унапређује продуктивност процеса тестирања. Једна студија истиче корист у разумљивости и одрживости тестног кода [22], јер LLM-ови могу да анализирају постојеће тестове и предложе семантичке исправке. Насупрот томе, најчешће пријављена ограничења односе се на халуцинације и нетачне излазе [3-6,10,11,17,21], што доводи у питање репродуктивност и захтева људску валидацију резултата. Уочена је и ограничена генерализација [8,23] и зависност од формулације упита (енгл. *prompt dependency*) [18,19], што утиче на стабилност резултата и отежава поновљивост експеримената. Додатно, неколико студија наводи ограничења у сложеним сценаријима [1,18] и захтевност трошкова [2,20] као практичну баријеру за примену у индустрији. Велики језички модели тренутно највише доприносе унапређењу ефикасности и аутоматизације тестирања, али њихова поузданост остаје ограничена због нестабилности, халуцинација и недовољне генерализације. Њихова највећа вредност тренутно лежи у улози интелигентне подршке тестерима.

3.3. ИП3: Како различите конфигурације великих језичких модела утичу на квалитет и поузданост генерисаних резултата?

Различите конфигурације LLM-ова показују приметне разлике у квалитету и поузданости генерисаних тестова. Параметар температуре, као један од кључних параметара у процесу генерисања, контролише однос између детерминистичког понашања модела и разноврсности излаза, чиме директно утиче на стабилност, креативност и поузданост резултата.

Табела 2. Дистрибуција радова по температури

Категорија	**Број студија**
Без параметра температуре	16
Експериментална конфигурација	7
Подразумевана конфигурација	3

У највећем броју студија [1,3-9,12,14,17-20,22,23] тај параметар није наведен, што указује да истраживачи најчешће користе подразумеване поставке модела без експлицитне контроле овог параметра. Мањи број радова [13,16,21] експлицитно наводи подразумевану конфигурацију, али без детаљне анализе њиховог утицаја на квалитет излаза. Тиме се потврђује тренд ослањања на фабричке поставке комерцијалних модела. Неколико студија [2,10,11,13,15,16,21] спровело је експерименте са различитим вредностима, што представља изузетак у односу на целокупан корпус. Њихови резултати указују да ниже вредности доводе до веће конзистентности, мање халуцинација и тачнијих тестова, док више вредности повећавају разноврсност и потенцијал за откривање нових сценарија, али истовремено указују на већу стохастичност и појаву синтаксних или логичких грешака. Свеукупно, налази показују да ефекат температуре остаје недовољно емпиријски испитан, а заједница још није успоставила јасне смернице за оптимално подешавање конфигурационих параметара.

3.4. Препоруке за будућа истраживања

Резултати спроведеног прегледа указују да велики језички модели имају значајан потенцијал за унапређење процеса тестирања софтвера, али њихова примена захтева контролу и стандардизацију. Модели се показују најделотворнијим када се користе као

помоћни алати, уз људску валидацију генерисаних тестова. Посебну пажњу потребно је усмерити на систематско испитивање конфигурационих параметара, где параметар температуре контролише однос између детерминистичког и стохастичког понашања модела. Препоручује се експериментисање са нижим вредностима температуре у задацима који захтевају стабилност и тачност, док се више вредности могу користити у контексту проналажења разноврсних излаза. Даља истраживања треба да укључе поређење између комерцијалних и отворених модела. Коначно, неопходно је посветити више пажње квалитативним аспектима тестова, разумљивости, прецизности, одрживости у практичној употреби у реалним окружењима. Развој стандардизованих метрика представља предуслов за поуздано поређење резултата различитих студија.

4. ЗАКЉУЧАК

Налази овог истраживања указују да велики језички модели представљају значајан корак ка интелигентној аутоматизацији тестирања софтвера, али још увек нису достигли ниво поузданости неопходан за потпуну самосталност у овом процесу. Њихова највећа вредност тренутно лежи у улози подршке, где доприносе повећању ефикасности, покривености и брзини тестирања, док људска интервенција остаје неопходна ради валидације и контроле резултата. Доминација комерцијалних модела, попут GPT породице, потврђује њихову супериорност у квалитету генерисаних тестова, али истовремено указује на ограничену репродуктивност и зависност од затворених платформи. Отворени модели попут LlaMA и Mistral за сада показују потенцијал углавном у експерименталним сценаријима. Иако су предности LLM-ова најизраженије у домену повећања ефикасности, идентификована ограничења, халуцинације, недовољна генерализација и осетљивост на формулацију упита представљају кључне изазове за њихову ширу примену. Подаци показују да је параметар температуре ретко експлицитно анализиран, што упућује на недостатак систематских истраживања. Управо овај аспект може бити пресудан за развој поузданих и контролисаних LLM решења у тестирању. Свеукупно посматрано, велики језички модели данас представљају важан покретач промена у начину на који се софтвер тестира. Уместо да замене постојеће методе, они их надопуњују, убрзавају процес тестирања, смањују потребу за ручним радом и омогућавају брже откривање грешака. Њихов тренутни значај лежи у подршци стручњацима, а не у потпуној аутономији. Да би се тај потенцијал у потпуности искористио, потребна су даља емпиријска истраживања која ће се бавити стабилношћу, подешавањем параметара и поузданошћу резултата. Развој стандардизованих поступака и метрика представља неопходан корак ка томе да LLM-ови постану поуздан и интегрисан део процеса тестирања софтвера.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] R. F. de L. Junior, L. F. P. de B. Presta, L. S. Borborema, V. N. da Silva, M. L. de M. Dahia, and A. C. S. e Santos, “A Case Study on Test Case Construction with Large Language Models: Unveiling Practical Insights and Challenges,” Dec. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2312.12598

[2] M. Schäfer, S. Nadi, A. Eghbali, and F. Tip, “An Empirical Evaluation of Using Large Language Models for Automated Unit Test Generation,” Dec. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2302.06527

[3] Y. Chen, Z. Hu, C. Zhi, J. Han, S. Deng, and J. Yin, “ChatUniTest: A Framework for LLM-Based Test Generation,” in *FSE Companion - Companion Proceedings of the 32nd ACM International Conference on the Foundations of Software Engineering*, Association for Computing Machinery, Inc, Jul. 2024, pp. 572–576. doi: 10.1145/3663529.3663801.

[4] S. Karpurapu *et al.*, “Comprehensive Evaluation and Insights Into the Use of Large Language Models in the Automation of Behavior-Driven Development Acceptance Test Formulation,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 58715–58721, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3391815.

[5] G. Yi, Z. Chen, Z. Chen, W. E. Wong, and N. Chau, “Exploring the Capability of ChatGPT in Test Generation,” in *Proceedings - 2023 IEEE 23rd International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion, QRS-C 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 72–80. doi: 10.1109/QRS-C60940.2023.00013.

[6] A. Lops, F. Narducci, A. Ragone, and M. Trizio, “AgoneTest: Automated creation and assessment of Unit tests leveraging Large Language Models,” in *Proceedings - 2024 39th ACM/IEEE International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2024*, Association for Computing Machinery, Inc, Oct. 2024, pp. 2440–2441. doi: 10.1145/3691620.3695318.

[7] H. Koziolek, V. Ashiwal, S. Bandyopadhyay, and C. K. R, “Automated Control Logic Test Case Generation using Large Language Models,” May 2024, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2405.01874

[8] A. Guo *et al.*, “SoVAR: Build Generalizable Scenarios from Accident Reports for Autonomous Driving Testing,” in *Proceedings - 2024 39th ACM/IEEE International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2024*, Association for Computing Machinery, Inc, Oct. 2024, pp. 268–280. doi: 10.1145/3691620.3695037.

[9] Z. Wang, K. Liu, G. Li, and Z. Jin, “HITS: High-coverage LLM-based Unit Test Generation via

Method Slicing," Aug. 2024, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2408.11324

[10] T. Le, T. Tran, D. Cao, V. Le, T. Nguyen, and V. Nguyen, "KAT: Dependency-aware Automated API Testing with Large Language Models," Jul. 2024, doi: 10.1109/ICST60714.2024.00017.

[11] L. Yang *et al.*, "On the Evaluation of Large Language Models in Unit Test Generation," in *Proceedings - 2024 39th ACM/IEEE International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2024*, Association for Computing Machinery, Inc, Oct. 2024, pp. 1607–1619. doi: 10.1145/3691620.3695529.

[12] T.-O. Li *et al.*, "Nuances are the Key: Unlocking ChatGPT to Find Failure-Inducing Tests with Differential Prompting," Sep. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2304.11686

[13] S. Kang, J. Yoon, N. Askarbekkyzy, and S. Yoo, "Evaluating Diverse Large Language Models for Automatic and General Bug Reproduction," Nov. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2311.04532

[14] S. Bhatia, T. Gandhi, D. Kumar, and P. Jalote, "Unit Test Generation using Generative AI : A Comparative Performance Analysis of Autogeneration Tools," Feb. 2024, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2312.10622

[15] A. M. Dakhel, A. Nikanjam, V. Majdinasab, F. Khomh, and M. C. Desmarais, "Effective Test Generation Using Pre-trained Large Language Models and Mutation Testing," Aug. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2308.16557

[16] C. Lemieux, J. Priya Inala, S. K. Lahiri, and S. Sen, "CODAMOSA: Escaping Coverage Plateaus in Test Generation with Pre-trained Large Language Models." [Online]. Available: https://github.com/microsoft/codamosa.

[17] K. El Haji, C. Brandt, and A. Zaidman, "Using GitHub Copilot for Test Generation in Python: An Empirical Study," in *Proceedings - 2024 IEEE/ACM International Conference on Automation of Software Test, AST 2024*, Association for Computing Machinery, Inc, Apr. 2024, pp. 45–55. doi: 10.1145/3644032.3644443.

[18] S. Kang, J. Yoon, and S. Yoo, "Large Language Models are Few-shot Testers: Exploring LLM-based General Bug Reproduction," Jul. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2209.11515

[19] M. Nabeel, D. D. Nimara, and T. Zanouda, "Test Code Generation for Telecom Software Systems using Two-Stage Generative Model," Apr. 2024, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2404.09249

[20] J. Hoffmann and D. Frister, "Generating Software Tests for Mobile Applications Using Fine-Tuned Large Language Models," in *Proceedings - 2024 IEEE/ACM International Conference on Automation of Software Test, AST 2024*, Association for Computing Machinery, Inc, Apr. 2024, pp. 76–77. doi: 10.1145/3644032.3644454.

[21] N. Alshahwan *et al.*, "Automated Unit Test Improvement using Large Language Models at Meta," in *FSE Companion - Companion Proceedings of the 32nd ACM International Conference on the Foundations of Software Engineering*, Association for Computing Machinery, Inc, Jul. 2024, pp. 185–196. doi: 10.1145/3663529.3663839.

[22] A. Deljouyi, "Understandable Test Generation Through Capture/Replay and LLMs," in *Proceedings - International Conference on Software Engineering*, IEEE Computer Society, Apr. 2024, pp. 261–263. doi: 10.1145/3639478.3639789.

[23] L. Plein, W. C. Ouédraogo, J. Klein, and T. F. Bissyandé, "Automatic Generation of Test Cases based on Bug Reports: A Feasibility Study with Large Language Models," in *Proceedings - International Conference on Software Engineering*, IEEE Computer Society, Apr. 2024, pp. 360–361. doi: 10.1145/3639478.3643119.

Кратка биографија:



Давид Фејеш рођен је у Вршцу 1999. год. Основне академске студије на Факултету техничких наука из области Инжењерство информационих система завршио је 2023. год. Исте године уписује мастер студије на истом смеру.
Контакт: david.fejes@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 004:007
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35OI04Andric

Упоредна анализа микросервисне и serverless архитектуре у дизајну дистрибуираних система

Comparative Analysis of Microservices and Serverless Architectures in Distributed System Design

Валентина Андрић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Област – ИНЖЕЊЕРСТВО ИНФОРМАЦИОНИХ СИСТЕМА

Кратак садржај – *Овај рад анализира савремене архитектуре за развој дистрибуираних система, са посебним фокусом на микросервисну и serverless архитектуру. Приказане су њихове основне карактеристике, начин функционисања, као и предности и недостаци у различитим сценаријима примене. Кроз упоредну анализу разматрају се кључни критеријуми избора, као што су скалабилност, трошкови, одржавање и сложеност система. Циљ рада је да пружи јасне смернице за избор одговарајуће архитектуре у зависности од пословних и техничких захтева савремених софтверских система.*

Кључне речи: *Микросервисна архитектура, serverless архитектура, дистрибуирани ситеми, скалабилност, перформансе*

Abstract – *This paper analyzes modern architectures for the development of distributed systems, with a particular focus on microservice and serverless architectures. Their fundamental characteristics, operating principles, as well as advantages and disadvantages in various application scenarios are presented. Through a comparative analysis, key criteria for architecture selection are examined, including scalability, cost, maintenance, and system complexity. The goal of this paper is to provide clear guidelines for selecting an appropriate architecture based on the business and technical requirements of modern software systems.*

Keywords: *Microservice architecture, serverless architecture, distributed systems, scalability, performance*

НАПОМЕНА: Овај рад је проистекао из матер рада чији ментор је био доцент др Марко Арсеновић.

1. УВОД

Савремени софтверски системи постају све сложенији, са растућим обимом података и захтевима за високом доступношћу, перформансама и скалабилношћу. Како апликације еволуирају, њихова архитектура се мења од једноставних монолита до комплексних микросервисних и serverless система. Избор одговарајуће архитектуре кључно утиче на перформансе, одржавање и развој система. Док су монолитни системи имали ограничења у скалабилности и флексибилности, сервисно оријентисане архитектуре донеле су већу модуларност. Данас су доминантни приступи микросервисна и serverless архитектура, који се разликују по начину дефинисања граница система, расподели одговорности и дизајну инфраструктуре. Рад се фокусира на упоредну анализу ова два приступа, истичући предности, недостке и применљивост у различитим ситуацијама, уз теоријски преглед и студију случаја.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

Ово поглавље даје сажет преглед еволуције апликационих архитектура и основних концепата дистрибуираних система, као теоријску основу за разумевање савремених архитектонских приступа. Развој софтверских система условљен је растућом сложеношћу пословних захтева, потребом за већим перформансама и ефикаснијим скалирањем, што је довело до постепеног превазилажења једноставних архитектонских модела и увођења флексибилнијих решења. Слика 1 илуструје еволутивни развој софтверских архитектура о чему ће бити речи у наставку.

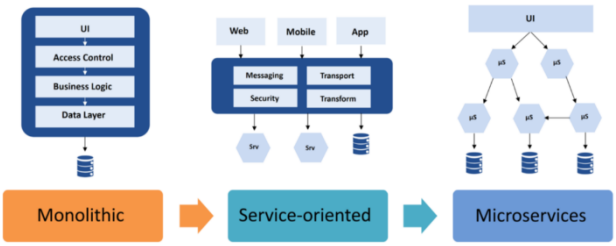
Монолитна архитектура представља полазну тачку у развоју већине апликација, јер омогућава једноставну имплементацију и управљање у почетним фазама. Међутим, како системи расту, јављају се ограничења у погледу одржавања, скалабилности и тимског рада [2]. Као еволутивни корак, развијени су модуларни монолит и вишеслојна архитектура, који уводе јаснију организацију кода и сепарацију одговорности, чиме се постављају темељи за дистрибуиране системе.

Даљи развој довео је до појаве сервисно оријентисане архитектуре *event-driven* и микросервисне архитектуре, које омогућавају поделу система на мање, логички независне компоненте које комуницирају преко мреже. Ови приступи доносе већу скалабилност, флексибилност и отпорност на грешке, али истовремено уводе већу сложеност у погледу комуникације, мониторинга и управљања системом. Serverless архитектура са друге стране представља највиши ниво апстракције, при чему је инфраструктура

у потпуности препуштена *cloud* провајдерима, што додатно поједностављује развој, али намеће нова ограничења.

Микросервисна архитектура представља еволуцију SOA (*Service-Oriented Architecture)* концепта, у којој је систем подељен на мале, независне сервисе са јасно дефинисаним одговорностима и сопственим базама података. Овакав приступ омогућава лакши развој, тестирање и дистрибуцију сервиса, бољу скалабилност и већу отпорност на грешке, али уводи већу сложеност у управљању и одржавању система.

Serverless архитектура представља виши ниво апстракције, где cloud провајдер у потпуности управља инфраструктуром, а апликациона логика се извршава кроз функције на захтев FaaS (*Function-as-a-Service*). Овај модел омогућава аутоматско скалирање и ефикасније коришћење ресурса, али уз одређена ограничења у контроли окружења и управљању стањем система.



Слика 1. Приказ еволуције софтверских архитектура [3]

2.1. Основни концепти дистрибуираних система

Дистрибуирани системи се заснивају на сарадњи више међусобно повезаних компоненти које за корисника функционишу као јединствена целина. Њихове кључне карактеристике су скалабилност, поузданост и транспарентност, као и потреба за компромисима у складу са CAP (*Consistency, Availability, Partition Tolerance)* теоремом [4]. Иако уносе додатну сложеност, дистрибуирани системи омогућавају бољу организацију тимова, већу отпорност на отказе и лакше прилагођавање променљивим захтевима, због чега представљају основу савремених софтверских архитектура о чему ће бити речи даље у овом раду.

3. МІКРОСЕРВИСИ

Микросервисна архитектура последњих година постаје један од доминантних приступа у развоју савремених софтверских система, како за нове апликације, тако и за модернизацију постојећих решења. Основна идеја овог приступа јесте декомпозиција сложених система на мање, логички независне сервисе који реализују јасно дефинисане пословне функционалности и међусобно комуницирају преко мреже. Једна од кључних предности микросервисне архитектуре јесте јасна подела одговорности и висок степен аутономије појединачних сервиса. Сваки микросервис се може независно развијати, тестирати, распоређивати и скалирати, што омогућава брже увођење промена и бољу отпорност система на отказе. Независно управљање подацима по сервису повећава флексибилност и смањује међузависност компоненти, док асинхрони комуникациони обрасци доприносе слабој спрегнутости и бољој скалабилности система [8]. Микросервиси такође омогућавају технолошку хетерогеност, односно избор најпогоднијих програмских језика, база података и алата у складу са специфичним захтевима појединих сервиса. Овај приступ позитивно утиче на перформансе и одрживост система, као и на организацију тимова, који се могу структурирати око појединачних сервиса и радити паралелно, са јасно дефинисаним одговорностима.
Са друге стране, микросервисна архитектура уводи значајну сложеност у дизајну и одржавању система. Управљање дистрибуираним компонентама, комуникацијом и отказима захтева пажљиво планирање и добро познавање домена. Одржавање конзистентности података представља посебан изазов, јер се системи често ослањају на модел смањене конзистенције, што захтева додатне механизме синхронизације и обраде изузетака.

Поред тога, микросервисни системи обично носе веће инфраструктурне и организационе трошкове, као и повећане захтеве у погледу безбедности и *DevOps* пракси. Због тога микросервиси нису увек оправдан избор, нарочито за мање системе и тимове, где једноставнији архитектонски приступи могу бити ефикаснији. Успешна примена микросервисне архитектуре захтева искусне тимове, адекватне алате и јасно дефинисане архитектонске принципе.

4. *SERVERLESS* АРХИТЕКТУРА

Serverless архитектура представља савремени приступ развоју апликација у којем је управљање инфраструктуром у потпуности препуштено cloud провајдеру, а ресурси се користе по потреби. Главна предност овог модела је поједностављење процеса развоја, тестирања и извршавања апликација, јер програмери не морају да се баве конфигурацијом и одржавањем сервера. Поред тога, модел наплате по потрошњи омогућава оптимизацију трошкова, док аутоматско скалирање прилагођава ресурсе тренутном оптерећењу, обезбеђујући висок ниво флексибилности и доступности система. Serverless архитектура такође омогућава фокус на развој пословне логике, изолацију појединачних функција и лакше управљање ресурсима, што је посебно погодан приступ за стартап компаније, виртуелне асистенте и *chatbot*-е са непредвидивим оптерећењем [5].

Са друге стране, ова архитектура доноси и одређене изазове. Примена serverless решења ствара зависност од конкретног cloud провајдера, што отежава миграцију на другу платформу. Усвајање овог приступа може бити комплексно за тимове без претходног искуства, нарочито због специфичних концепата као што су дебаговање и управљање отказима. Serverless је најпогоднији за краткотрајне и брзе задатке, док дуготрајни и комплексни процеси могу бити ограничени. Такође, у IoT (*Internet of Things*) апликацијама поузданост система у великој мери зависи од стабилности интернет конекције, што може

представљати додатни изазов. Serverless архитектура доноси значајне предности у смислу флексибилности и трошкова, али њена примена мора бити добро планирана и прилагођена специфичним захтевима апликације.

5. МИКРОСЕРВИСИ НАСПРАМ SERVERLESS АРХИТЕКТУРЕ

Табела 1. Поређење serverless и микросервисне архитектуре

Карактеристика	**Serverless**	**Микросервиси**
Архитектура	Апликација од функција на захтев	Апликација од независних сервиса
Управљање инфраструктуром	Cloud провајдер	Тим (сервери, контејнери, оркестрација)
Deployment јединица	Функција	Сервис
Скалирање	Аутоматско	Ручно или помоћу алата
Трошкови	Плаћање по извршавању	Плаћање за стално активну инфраструктуру
Стање (state)	Углавном stateless	Stateless или stateful
Перформансе	Може бити кашњење при првом позиву (cold start)	Стабилне
Контрола окружења	Ограничена	Потпуна
Комплексност	Мања	Већа, захтева DevOps знање
Зависност од трећих страна	Више ослањања (BaaS)	Слободан избор
Погодно за апликације	Мале и средње	Велике, комплексне

Табела 1 описује поређење serverless и микросервисне архитектуре са аспекта скалабилности, трошкова, сложености имплементације и начина управљања ресурсима.

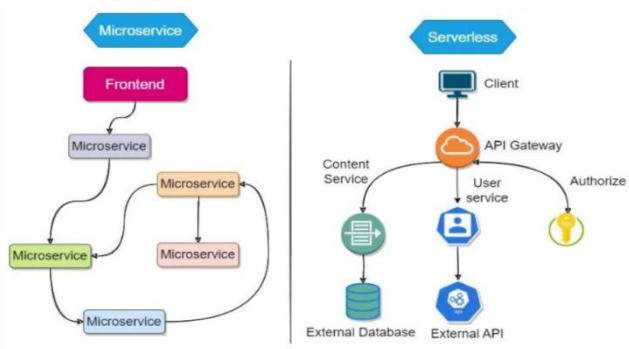
Serverless архитектура као што је већ речено заснива се на извршавању апликационе логике као функција које се активирају догађајима, при чему cloud провајдер управља инфраструктуром, скалирањем, безбедношћу и мониторингом. Клијентска апликација комуницира преко API (*Application programming interface*) *Gateway*-а, који рутира захтеве ка одговарајућим функцијама (нпр. сервис за кориснике или садржај) као што се може видети на слици 2.

Микросервисна архитектура, са друге стране, користи дуготрајно активне сервисе који могу да задрже стање, кеширају податке и имају трајне конекције ка базама података (слика 2). Континуирано праћење перформанси и доступности омогућава стабилније извршавање сложенијих захтева.

Serverless омогућава аутоматско и тренутно скалирање по потреби, погодан је за апликације са променљивим оптерећењем (нпр. онлајн резервације карата), а плаћање је по коришћеном ресурсу (*„pay-as-you-go“*). Микросервисна архитектура омогућава пуну контролу инфраструктуре, стабилне перформансе без *cold start*-а и захтева DevOps знање за управљање и скалирање сервиса [7].

Serverless функције су углавном *stateless*, док микросервиси могу бити и stateless и *stateful,* што омогућава праћење сесија, кеширање и дуготрајне процесе. Serverless је мање комплексна на почетку развоја и погодна је за мање и средње апликације, док микросервиси захтевају веће искуство, али су погодни за велике и дугорочне системе.

Serverless се ослања на cloud провајдера и BaaS (*Business-as-a-service*) услуге, што може ограничити избор алата, док микросервисна архитектура омогућава слободан избор зависности и већи степен контроле.



Слика 2. Упоредни приказ микросервисне и serverless архитектуре [1]

5.1. Хибридни приступ

Хибридни приступ користи микросервисе за дуготрајне и критичне делове система, а serverless функције за једноставне, догађајима покренуте задатке (нпр. обрада фајлова, слање нотификација, периодични задаци). Алати као *Logic Apps* или *Step Functions* омогућавају тригере и интеграцију микросервиса као функција. *Netflix, Amazon, Google, Spotify* и *Uber* су примери где се

користи ова комбинација за максималну флексибилност и оптимизацију ресурса.

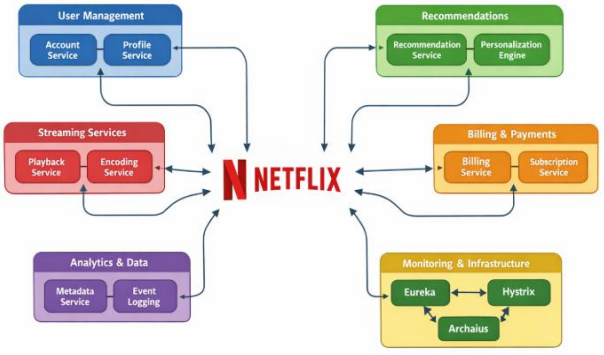
6. СТУДИЈА СЛУЧАЈА: NETFLIX

Netflix је у раним годинама радио као монолитна апликација, где је цела пословна логика била у једном систему. Такав приступ је функционисао док је систем био мали, али са растом броја корисника и захтева за новим функцијама, ограничења су постала видљива. Преласком на микросервисну архитектуру (слика 3), појединачни сервиси могу отказивати изоловано, без утицаја на целокупно корисничко искуство, а независни развој и deploy сервиса убрзали су циклус развоја [6]. Netflix ради на AWS платформи, користећи сервисе као што су:

- **EC2** (*Elastic Compute Cloud)* – за захтевне обраде и енкодирање видео садржаја,
- **S3** (*Simple Storage Service*)– за складиштење садржаја и метаподатака,
- ***DynamoDB и Cassandra*** – NoSQL базе за корисничке податке,
- **AWS Lambda** (*Amazon Web Services Lambda*) – за serverless функције (обрада логова, анализа података),
- **ELB** (*Elastic Load Balancing*) – за расподелу саобраћаја,
- ***Kinesis и Kafka*** – за стримовање и обраду података у реалном времену.

Клијентски слој обухвата мобилне апликације, паметне телевизоре и веб прегледаче, који шаљу захтеве преко API Gateway-а ка микросервисима. Слој микросервиса се извршава на *Titus* платформи, што омогућава независно скалирање и изолацију грешака.

Слој података користи Cassandra, S3 и Kafku за обраду великих количина података са високом доступношћу и ниском латенцијом. Слој за праћење укључује *Atlas* (метрике), *Spinnaker* CI/CD (*Continuous Integration/Continuous Delivery)* и примену *Chaos Engineering* приступа, укључујући алат *Chaos Monkey* који намерно изазива отказе како би се тестирала отпорност система и обезбедила континуирана стабилност [6].



Слика 3. Приказ архитектуре Netflix-а на високом нивоу

7. ЗАКЉУЧАК

У овом раду анализиране су микросервисна и serverless архитектура као савремени приступи развоју дистрибуираних система. Кроз упоредну анализу показано је да избор архитектуре зависи од карактеристика система, оптерећења и потребе за контролом над инфраструктуром, те да не постоји универзално решење.

Истакнут је значај правилног архитектонског дизајна у раним фазама развоја, јер он директно утиче на скалабилност, одрживост и трошкове система. Такође, закључује се да ове архитектуре могу бити комплементарне, при чему њихова комбинација омогућава већу флексибилност и ефикасније коришћење ресурса.

Будућа истраживања могу бити усмерена на практичну имплементацију и детаљније поређење перформанси у реалним условима.

8. ЛИТЕРАТУРА

[1] Arslan Ahmad: "*Monoliths vs Microservices vs Serverless*: Choosing the Right Architecture", 2023.

[2] Sandra Đuričin: *Migracija monolitnog sistema na mikroservisnu arhitekturu*, 2022.

[3] Shayesteh Arfa Mahdi, "Microservices vs SOA", 2023.

[4] George Coulouris, Jean Dollimore, Tim Kindberg, Gordon Blair, *Distributed Systems: Concepts and Design*, Addison-Wesley, 2012.

[5] Lizheng Jiang, Yunman Pei, Jiantao Zhao, "Overview of Serverless Architecture Research", 2019.

[6] Kovvuru Ismail: *How Netflix Designed Its Global Cloud Architecture on AWS: The Real Reason Netflix Moved to AWS*. November 11, 2025.

[7] Eric Brewer: *Towards Robust Distributed Systems*, Proceedings of the ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, 2000.

[8] Sam Newman: *Building Microservices*, O'Reilly Media, 2015.

Кратка биографија:



Валентина Андрић рођена је у Прибоју 2000. год. Дипломирала на Факултету техничких наука, на смеру Инжењерство информационих система, 2023 год.

Зборник радова Факултета техничких наука, НовиСад

УДК: 621.317
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35RB01Probojcevic

Анализа и прорачун параметара радиохируршког система

Analysis and Calculation of Radiosurgical System Parameters

Мила Пробојчевић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – БИОМЕДИЦИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

Кратак садржај – *Циљ овог рада је да се, применом идеализованог модела дозног поља, анализира утицај ширине колиматора и конфигурације шотова на расподелу дозе код сложене туморске лезије. Анализиране су изодозне линије, дозно-запремински хистограми и дозиметријски параметри за план са једним и два шота. Овако дефинисана анализа омогућава да се, у контролисаном и идеализованом нумеричком окружењу, прикаже утицај одређених параметара система на исход плана третмана.*

Кључне речи: *гама нож, колиматори, дозна расподела*

Abstract – *The aim of this study is to evaluate how collimator size and shot configuration influence dose distribution in a complex tumor geometry using an idealized numerical dose model. The analysis includes isodose maps, dose–volume histograms, and dosimetric indices for both single-shot and dual-shot treatment configurations. By examining these parameters within a controlled and simplified computational environment, the study highlights how specific planning choices affect the overall quality and effectiveness of stereotactic radiosurgery plans.*

Keywords: *gamma knife, collimators, dose distribution*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Платон Совиљ, ред. проф.

1. УВОД

Стереотактичка радиохирургија (енгл. *stereotactic radiosurgery*, SRS) представља неинвазивну методу лечења тумора и других патолошких промена унутар лобање применом високо фокусираног јонизујућег зрачења у једној или неколико фракција. За разлику од конвенционалне радиотерапије, која испоручује ниску дозу зрачења у већем броју поновљених фракција и обухвата релативно широко поље зрачења, стереотактичка радиохирургија користи ограничен број фракција са знатно већом дозом по фракцији. На овај начин се омогућава прецизно фокусирање зрачења у циљни волумен уз минимално оштећење здравог околног ткива. Гама нож (енгл. *Gamma Knife,* GK) представља један од најзначајнијих система за стереотактичку радиохирургију мозга, који је средином двадесетог века развио шведски неурохирург Ларс Лексел [1].

2. ГАМА НОЖ

2.1. Физичке основе и геометрија система

Основни физички принцип рада гама ножа се заснива на принципу центра лука. Циљна тачка се позиционира у геометријски центар полусферне конфигурације извора, тако да се сви појединачни снопови гама зрачења укрштају у једној тачки, тзв. изоцентру [2]. Овај концепт омогућава тродимензионално позиционирање циљног волумена у прецизно дефинисаном Декартовом координатном систему, уз могућност усмеравања зрачења из великог броја праваца са изузетно високом тачношћу. Извор зрачења у гама нож систему је радиоактивни изотоп кобалт-60 (Co-60), који се добија неутронском активацијом стабилног кобалта-59 у нуклеарном реактору. Гама нож је конципиран као систем са сферном конвергентном геометријом, тако да је укупно 201 извор кобалт-60 распоређен унутар масивног челичног кућишта у полусферној конфигурацији, тако да оса сваког извора пролази кроз изоцентар. Сваки појединачни сноп има релативно ниску дозну снагу, па пролазак кроз здраво ткиво не изазива значајно оштећење. Међутим, у изоцентру се 201 сноп суперпонира, што доводи до формирања високог локалног максимума дозе. Овако дефинисана геометрија омогућава веома стрмо опадање дозе изван циљног волумена, што представља једну од кључних предности гама ножа у односу на друге радиохируршке системе [3].

2.2. Конструкција и компоненте система

Радиоактивни извори смештени су унутар масивног полусферног челичног блока и представљају централни елемент система. Сваки извор се налази у сопственом металном каналу који дефинише прецизан угао емисије гама зрака у односу на централну осу уређаја. Сваки појединачни сноп затим пролази кроз колиматорски систем, који чине металне цевчице и отвори специјално обликовани да дефинишу пречник, облик и усмерење зрачења. Примарни колиматори уграђени су директно у конструкцију уређаја и имају улогу грубог ограничавања угла емисије. Прецизна контрола ширине снопа добија се путем секундарних колиматора смештених у колиматорским кацигама [1, 3]. Кључни елемент целокупног система је стереотактички рам, који омогућава стабилну

фиксацију главе пацијента и дефинисање координатног система Декартовом простору. Позиционирање пацијента у односу на изоцентар врши се помоћу аутоматизованог система за позиционирање, који омогућава померање рама у три ортогонална правца. Цео систем смештен је у челично кућиште које обезбеђује ефикасну заштиту медицинског особља. Кућиште садржи аутоматизовани механизам заштитних врата који омогућава емитовање зрачења искључиво током третмана. Комбинованим деловањем свих описаних компоненти постиже се висок степен просторне прецизности, механичке стабилности и поновљивости поступка [3,4].

3. ДОЗИМЕТРИЈА, ЗАШТИТА И ПЛАНИРАЊЕ

3.1. Радиобиолошка основа и ограничења здравог ткива

Дејство јонизујућег зрачења на биолошко ткиво представља сложен процес који се одвија на молекуларном, ћелијском и ткивном нивоу. Најважнији догађај унутар ћелије је јонизација, односно избацивање електрона из атомских орбита услед апсорпције енергије високоенергетских фотона. Овим процесом настају примарни јони и слободни радикали који могу оштетити виталне компоненте ћелије, међу којима је најкритичнија дволанчана ДНК. Оштећење ДНК може настати директним или индиректним механизмом, а коначан исход ових процеса зависи од врсте ћелије, фазе ћелијског циклуса, присуства механизма поправке ДНК и апсорбоване дозе зрачења и може резултовати потпуном репарацијом, апоптозом, митотичком катастрофом или некрозом. У контексту радиохирургије гама ножем, где се примењује висока доза у једној фракцији, пресудна је за способност зрачења да изазове неповратна оштећења ДНК код туморских ћелија, уз минимално нарушавање виталних функција околног здравог ткива. Оваква биолошка селективност представља основу клиничке ефикасности ове методе [5].

Ефикасност стереотактичке радиохирургије и од очувања здравих можданих структура које окружују циљни волумен. За разлику од туморских ћелија, здраве ћелије имају ограничену способност репарације када је доза испоручена одједном, због чега чак и релативно мали волумени могу развити некрозу уколико се пређе одређени праг. Степен токсичности зависи и од апсолутне дозе и од запремине ткива која ту дозу прима. Веће лезије захтевају више изоцентара и веће колиматоре, што доводи до ширења зоне високих изодоза и повећава запремину здравог околног ткива које прима зрачење. Из тог разлога су ограничења здравог ткива често доминантан фактор у одређивању плана, па се избор колиматора и облик изодозних површина прилагођавају тако да критичне структуре мозга остану унутар прихватљивих дозних прагова [6].

3.2. Формирање изодозних површина

Изодозне површине представљају централни концепт у анализи дозне расподеле у стереотактичкој радиохирургији. Оне се дефинишу као 3D површине које повезују све тачке у простору које примају исту апсорбовану дозу зрачења. У 2D приказима ове површине се визуализују као изодозне линије односно криве једнаке дозе. Конкретно, у систему гама ножа, због симетричне геометрије извора зрачења и принципа центра лука, изодозне површине имају приближно сферни облик. Највиша доза је локализована у изоцентру, док доза нагло опада према периферији. Овај ефекат, познатији као стрми дозни градијент, представља једну од најважнијих физичких предности гама ножа, јер омогућава да висок ниво дозе остане ограничен на циљни волумен, уз минимално оштећење здравог ткива. У клиничкој пракси, изодозне површине се најчешће изражавају као проценти у односу на максималну дозу у изоцентру. За терапијску изодозу најчешће се користи површина која обухвата 50 % или 70 % максималне дозе, јер обезбеђује добар баланс између ефикасности третмана и очувања здравог ткива. Квалитет дозне расподеле процењује се према степену подударности између изодозне површине и облика туморског ткива, што представља меру конформности, као и према равномерности дозе унутар циљног волумена, што се описује као хомогеност. Код неправилно обликованих лезија, висока конформност се постиже комбиновањем више изоцентара и различитих ширина снопова. Овај приступ омогућава формирање комплексних изодозних површина које прате морфологију лезије и представља основу савременог планирања у гама нож радиохирургији [7,8].

4. НУМЕРИЧКО МОДЕЛОВАЊЕ И АНАЛИЗА ДОЗНЕ РАСПОДЕЛЕ

4.1 Модел дозне расподеле и методологија анализе

Модел је реализован у програмском окружењу MATLAB, на 3D правоугаоној мрежи тачака која представља део интракранијалног простора око изоцентра зрачења. Нумеричко окружење је дефинисано тако што су координате *x, y* и *z* равномерно распоређене у интервалу од *-L* до *+L*, са кораком *step*. На тај начин је формирана кубна мрежа тачака у којој је свака тачка описана сопственом просторном координатом и растојањем од изоцентра. За сваку тачку мреже рачуна се:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\ , \qquad (1)$$

где параметар *r* [mm] представља удаљеност било које тачке мреже од изоцентра. Дозни профил појединачног снопа је апроксимиран функцијом типа потиснути Гаус четвртог реда, која реалистичније описује нагли пад дозе изван центра зрачења од класичне Гаусове функције. Кључни параметар ове расподеле је ширина снопа на половини максималне висине *FWHM* [mm], која у клиничкој пракси одговара номиналном пречнику колиматора. Ефективни параметар ширине дистрибуције *σ* [mm] се добија следећим изразом:

$$\sigma = \frac{FWHM}{2\sqrt{2ln2}}. \qquad (2)$$

На основу тога, модел дозног поља једног шота дефинише се функцијом:

$$D_{raw}(r) = e^{[-(\frac{r}{\sigma})^4]}, \qquad (3)$$

при чему је $D_{raw}(r)$ бездимензиона вредност дозе у тачки на растојању r. Како би се модел ускладио са типичним стереотактичким дозама, целокупно дозно поље је скалирано тако да максимална доза у изоцентру износи 32 Gy. Скалирање је извршено нормализацијом:

$$D(x,y,z) = D_{raw}(x,y,z) \cdot \frac{32}{\max(D_{raw})}, \quad (4)$$

где је $D(x,y,z)$ [Gy] апсорбована доза у тачки мреже, а $\max(D_{raw})$ [Gy] максимална вредност модела пре нормализације. Овим поступком се обезбеђује да је:

$$D_{max} = 32 \text{ Gy}. \quad (5)$$

У даљој анализи маргинална доза је постављена на 16 Gy, што одговара педесетопроцентној изодози у односу на максималну дозу у изоцентру. Ова вредност је изабрана јер је 50 % изодоза референтна линија у стандардној клиничкој пракси за гама нож [8, 9, 10].

У оквиру модела анализиран је случај сложене, неправилне лезије, код које су истовремено присутне две сферичне компоненте различитих пречника, $R_1 = 5$ mm и $R_2 = 3$ mm, при чему је растојање између њихових центара $d = 7$ mm. На 3D мрежи је формирана бинарна маска тумора која обухвата унију две сферичне запремине тумора. Тачка мреже припада тумору уколико задовољава бар један од услова:

$$(x^2 - x_1) + (y^2 - y_1) + (z^2 - z_1) \leq R_1^2, \quad (6)$$

$$(x^2 - x_2) + (y^2 - y_2) + (z^2 - z_2) \leq R_2^2, \quad (7)$$

где су (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) координате центара веће и мање туморске компоненте. На основу овако дефинисане туморске маске, маска здравог ткива је формирана тако што све тачке које не припадају тумору чине запремину нормалног ткива. За овакву сложену лезију су упоређена два плана зрачења - план са једним шотом и план са два шота. У плану са једним шотом је коришћен колиматор ширине $FWHM = 16$ mm, постављен у заједничком изоцентру две туморске компоненте. Са друге стране, у плану са два шота су коришћена два колиматора различите ширине, где је колиматор веће ширине $FWHM = 16$ mm позициониран тако да покрије већу туморску лезију, док је колиматор мање ширине $FWHM = 8$ mm усмерен ка мањој лезији. Укупна расподела дозе је добијена сабирањем доприноса оба шота и накнадном нормализацијом на исту максималну дозу и маргиналну дозу као у плану са једним шотом, чиме је омогућено директно поређење планова. На основу овако дефинисаних дозних поља, маски тумора и нормалног ткива, за сваки план су формирани дозно-запремински хистограми посебно за тумор и за здраво ткиво. У оквиру нумеричког поступка, дозе унутар изабране маске се посматрају као скуп дискретних вредности по вокселима, групишу се у мали број уских дозних интервала, а затим се рачуна кумулативни удео запремине која прима дозу једнаку или већу од задате вредности. На тај начин су добијене DVH криве које квантитативно описују расподелу дозе у туморској лезији и нормалном ткиву за посматране планове лечења [7, 8, 9].

Поред формирања модела, предвиђено је и израчунавање кључних дозиметријских параметара који се користе у стереотактичкој радиохирургији за процену квалитета плана. Ови параметри се добијају на основу дозно-запреминских хистограма, а обухватају дозу покривености D_{95} [Gy] као и стандардне радиобиолошко-геометријске параметре: покривеност Coverage, индекс конформности (енгл. *conformity index*, CI) и запремина нормалног ткива која прима најмање 12 Gy $V12$ [mm^3] . Ове величине се у моделу рачунају директно из дискретних дозних вредности у појединачним вокселима. Формално, основни параметри се дефинишу следећим формулама:

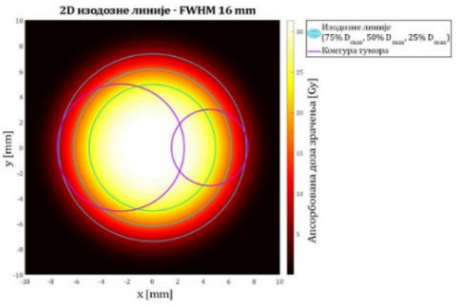
$$Coverage = \frac{TV_{Dm}}{TV}, \quad (8)$$

$$CI = \frac{TV_{Dm}^2}{TV \cdot PIV}, \quad (9)$$

где је TV [mm^3] укупна запремина тумора, TV_{Dm} [mm^3] запремина тумора која прима дозу једнаку или већу од маргиналне дозе, PIV [mm^3] запремина простора у ком доза достиже најмању маргиналну вредност [4, 8, 9].

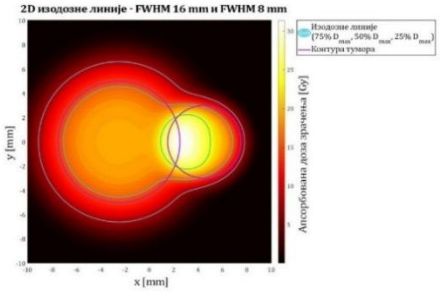
4.2 Резултати

На слици 1 је приказана 2D изодозна мапа са једним шотом, користећи колиматор ширине 16 mm, за сложену, двокомпонентну туморску структуру. Из приказа се уочава да изодозне линије углавном прате геометрију веће туморске компоненте, док мања компонента није у потпуности обухваћена маргиналном дозом. Област 50 % D_{max}, која је у моделу дефинисана као референтна маргинална доза, распоређена је тако да се доминантно концентрише око већег дела лезије, док мања компонента тумора остаје делимично покривена и са зонама знатно нижих доза. Ово указује на ограничења примене једног шота која се огледају у недостатку локалне прецизности што доводи до недовољног покривања сложене, асиметричне структуре.



Слика 1. 2D изодозне линије-план са једним шотом ширине колиматора 16 mm

Са друге стране, на слици 2 је приказан план са два шота, где је примењена комбинација колиматора ширине 16 mm за већу и 8 mm за мању туморску компоненту. У овом случају дозне линије природније прате цео облик туморске структуре. Маргинална доза равномерно обухвата обе компоненте, а зона високих доза је прецизно локализована и у већем и у мањем делу лезије, без непотребног ширења у околно ткиво. Мањи колиматор доприноси бољој просторној дефиницији дозе у мањем тумору, док већи колиматор стабилно покрива већу компоненту, чиме се постиже значајно боља укупна конфигурација дозног поља.



Слика 1. 2D изодозне линије-план са два шота ширина колиматора 8 mm и 16 mm

На дозно-запреминском хистограму, приказаном на слици 3, може се уочити изразита разлика између плана са једним шотом и плана са два шота. Крива која одговара плану са једним шотом показује изражену неуједначеност, при чему се значајан део туморске запремине налази у домену ниских доза, док само ограничена регија достиже вредности блиске терапијском опсегу. Овакав облик криве одражава недовољно покривање, што је у складу са просторним приказима изодоза на сликама где се примећује да 50 % изодоза не обухвата читаву сложену структуру. Са друге стране, DVH крива за план са два шота приказује да је већи део тумора изложен вишим дозама, а нагиб криве је стабилнији и ближи очекиваном профилу за адекватно зрачење сложених лезија. Може се закључити да се другачијим распоредима шотова постиже боља дистрибуција дозе односно да већи колиматор обезбеђује покривеност шире компоненте, док мањи колиматор локализује дозу у ужој области мањег туморског дела.



Слика 2. Поређење DVH кривих за план са једним и два шота

Разлике између два приступа додатно су потврђене вредностима дозиметријских параметара приказаним у табели 1. План са једним шотом показује ниску вредност *D95* и ограничену покривеност, што значи да маргинална доза не обухвата целу волуменску конфигурацију. Конформитет је низак, што указује на то да изодозна површина не прати адекватно сложену геометрију тумора, а вредност *V12* је велика, што резултује тиме да значајна запремина околног ткива прима непотребно веће дозе. Супротно томе, у плану са два шота се примећује већа вредност *D95*, што указује да оба туморска сегмента добијају дозу која је у складу са терапијским циљем. Покривеност је већа и стабилнија, а конформитет је приближно двоструко бољи, што показује да изодозна површина много прецизније прати облик двокомпонентне структуре. Вредност *V12* знатно мања, што указује на чињеницу да двоструки распоред снопова смањује непотребно зрачење нормалних можданих структура. На основу приложених резултата, може се закључити да план са два шота обезбеђује значајно бољи компромис између покривености, конформитета и заштите нормалног ткива. Овај приступ пружа могућност да обе компоненте сложене лезије буду адекватно обухваћене терапијском дозом, што један сноп, чак и великог пречника, не може да постигне у овом моделу.

Табела 1. Поређење дозиметријских параметара.

План	D95 [Gy]	Coverage	CI	V12 [mm^3]
1 шот	7.15	0.77	0.38	773.77
2 шота	14.83	0.79	0.75	275.06

5. ЗАКЉУЧАК

Анализа идеализованих модела туморских лезија показала је да избор колиматора и конфигурације шотова пресудно утичу на квалитет дозне расподеле у стереотактичкој радиохирургији гама ножем, при чему различити колиматори и више шотова обезбеђују боље дозиметријске параметре код сложенијих геометрија. Овакви модели омогућавају боље разумевање основних принципа формирања дозне расподеле и представљају основу за будућа проширења која би укључила реалистичније клиничке сценарије.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] L. M. Halasz, J. K. Rockhill, *Stereotactic radiosurgery and radiotherapy for brain metastases*, Surg. Neurol. Int., 2013.
[2] A. Bijlani et al., *SRS and SBRT cost-effectiveness results*, Front. Oncol., 2013.
[3] D. Schlesinger, *Historical and technical overview of Gamma Knife radiosurgery*, AAPM Summer School, 2014.
[4] IAEA, *Radiation Oncology Physics – Stereotactic Irradiation*, 2005.
[5] D. T. Goodhead, *Clustered DNA damage from ionizing radiation*, Int. J. Radiat. Biol., 1994.
[6] ICRU Report 91, *Prescribing, Recording, and Reporting Stereotactic Treatments*, ICRU, 2017.
[7] L. E. Olsson et al., *3D dose mapping from Gamma Knife treatment using gel dosimetry*, Radiother. Oncol., 1992.
[8] K. Antończyk-Szewczyk, B. Kozłowska, *Treatment planning parameters in Gamma Knife technique*, Appl. Radiat. Isot., 2021.
[9] A. Y. Xu et al., *Dose differences between three dose calculation algorithms in Leksell GammaPlan*, J. Appl. Clin. Med. Phys., 2014.

Кратка биографија:



Мила Пробојчевић рођена је у Нишу 2002. године. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Биомедицинског инжењерства - Одабрана поглавља из биомедицинске инструментације одбранила је 2026. године.
контакт: mila.probojcevic@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, НовиСад

УДК: 61:62
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35RB02Soknic

Мапирање мозга: технике и примена

Brain Mapping: Techniques and Applications

Адријана Сокнић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – БИОМЕДИЦИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

Кратак садржај – *Циљ овог рада је да пружи преглед савремених техника неуроимиџинга и њихове улоге у мапирању можданих функција, са осврtом на клиничку примену и значај приликом дијагностике и рехабилитације..*
Кључне речи: *Мапирање мозга, ЕЕГ, фМРИ, ЦТ*

Abstract – *The aim of this paper is to provide an overview of modern neuroimaging techniques and their role in mapping brain functions, with a particular focus on their clinical applications and importance in the diagnosis and rehabilitation.*

Keywords: *Brain mapping, fMRI, EEG, CT*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Платон Совиљ ред. проф.

1. УВОД

Мапирање мозга је скуп техника у неуронаукама које се заснивају на мапирању биолошких количина или својстава на просторне репрезентације људског или животињског мозга, чиме се добијају мапе. Оно се, такође, дефинише као проучавање анатомије и функције мозга или кичмене мождине кроз примену различитих метода. Све неуроимиџинг технике сматрају се делом мапирања мозга. Ове технике често комбинују слике мозга са додатним анализама или подацима, попут параметара понашања пројектованих на одређене регије мозга. Мапирање повезаности можданих кругова је од суштинског значаја за наше разумевање функција људског мозга. Различити неуролошки и ментални поремећаји су повезани са поремећајем повезаности мозга.

2. ИСТОРИЈАТ

Током протеклих 30 година, когнитивна неуронаука развила се као важна област у оквиру неуронаука, која је знатно утицала на област мапирања мозга. Ова неуронаука комбинује експерименталне стратегије когнитивне психологије са различитим техникама како би испитала на који начин функције мозга подржавају менталне активности. Главне технике истраживања код здравих људи укључују функционално снимање мозга, попут позитронске емисијске томографије (PET) и функционалне магнетне резонанце (fMRI), као и техника попут електроенцефалографије (EEG), електрокортикографије (ECoG*)*, магнетоенцефалографије (MEG) и у новије време, оптичког снимања блиском инфрацрвеном спектроскопијом (NIRS) [1]. Данас имамо мноштво техника које нам омогућавају да меримо функцију мозга код здравих људи свих узраста, више пута и безбедно, током значајних временских периода. Свака од ових техника има своје безбедносне аспекте и свака има карактеристична ограничења у погледу просторне и временске резолуције. Ипак, оне нам омогућавају да генеришемо податке који су прецизнији и који имају обећање да ће постати знатно бољи у блиској будућности.

3. АНАТОМИЈА И ФИЗИОЛОГИЈА МОЗГА

3.1. Основна подела мозга и његове функције

Мозак је орган који служи као центар нервног система код свих кичмењака и већине бескичмењака. Састоји се од нервног ткива и смештен је у глави, обично у близини органа за специјалне чулне функције као што су вид, слух и мирис. Као најспецијализованији орган, одговоран је за пријем информација од сензорног нервног система, обраду тих информација (мисли, когниција и интелигенција) и координацију моторне контроле (мишићна активност и ендокрини систем). Сви мозгови кичмењака могу се ембрионално поделити на три дела: предњи мозак, који се даље дели на теленцефалон и диенцефалон, средњи мозак и задњи мозак, који се дели на метенцефалон и миеленцефалон. Кичмена мождина, која директно интерагује са соматским функцијама испод главе, може се сматрати каудалним продужетком миеленцефалона унутар кичменог стуба. Заједно, мозак и кичмена мождина чине централни нервни систем свих кичмењака. Код људи, церебрални кортекс садржи између 14 и 16 милијарди неурона. Сваки неурон је повезан синапсама са неколико хиљада других неурона, обично комуницирајући међусобно путем изданака сличних коренима, који се зову дендрити, и дугих влакнастих изданака који се називају аксони, а који су обично мијелинизовани и носе брзе микро-електричне сигнале, познате као акциони потенцијали, до циљаних ћелија у другим деловима мозга или удаљеним деловима тела. Овај комплексни мрежни систем неурона, са дендритима и аксонима, чини основу за функционалну организацију мозга, при чему сива и бела маса играју кључне улоге. Бела маса се односи на области централног нервног система (CNS) које се углавном састоје од

мијелинизованих аксона, који се такође називају трактовима [2,3].

3.2. Повезивање функције и структуре

Технологије за снимање мозга све чешће се користе за стварање високорезолутивних референтних мапа мождане структуре и функције. Савремена научна открића зависе од упоређивања нових мапа (нпр. активација током задатака, групне структурне разлике) са овим референтним мапама. Иако су недавне иницијативе за дељење података повећале доступност оваквих можданих мапа, подаци се често деле у различитим координатним системима или просторима, што отежава систематична и тачна поређења међу њима. Емпиријске студије су открилe преклапање између структурних и функционалних веза у стању мировања, тј. присуство и структурне и функционалне везе између две регије мозга. Међутим, ово преклапање није савршено, јер функционалне интеракције између можданих регија постоје и у одсуству директних структурних веза, а ни индиректне структурне везе дужине два корака не могу у потпуности објаснити ове функционалне везе. Штавише, преклапање између структурних и функционалних веза зависи и од временске скале која се разматра. Када су функционалне везе процењене из већих временских оквира, оне се снажно преклапају са основним структурним везама. Међутим, за мање временске оквире може доћи до разлика између структурне и функционалне мреже због расподељених кашњења између неуронских популација, што узрокује пролазне фазне десинхронизације [4,5]. Према томе, разумевање односа између функције и структуре мозга захтева примену различитих експерименталних техника које омогућавају увид у мождану активност и повезаност. Не постоји само једна метода која може у потпуности обухватити сложеност можданих мрежа, због чега се у пракси користе комбиновани приступи.

4. ТЕХНИКЕ МАПИРАЊА МОЗГА

4.1. Функционалне технике

Функционално снимање представља проучавање функције људског мозга на основу анализе података добијених техникама као што су електроенцефалографија, магнетоенцефалографија, функционална магнетна резонанца, позитронска емисиона томографија или оптичко снимање. Циљ је разумевање рада мозга у смислу његове физиологије, функционалне архитектуре и динамике [6].

4.2. Електроенцефалографија

Електроенцефалографија (EEG) је далеко најчешћа неинвазивна метода за мерење електричне активности мозга. Она мери потенцијале мозга путем различитих врста електрода, које се постављају на скалп уз помоћ EEG капице. EEG је техника која се показала корисном када је у питању праћење стања или предвиђање развоја болести, као што је нпр. епилепсија. Пароксизмална активност расте како се приближава напад и релативно је тиха у периоду између напада. Антиконвулзивни лекови не спречавају дисритмију, али је до одређене мере смањују. Периодично праћење EEG-а често може открити антиконвулзивно дејство терапијског средства на пацијента. Дисритмија повезана са латентним конвулзивним поремећајима може се детектовати снимањем електроенцефалограма током сна. Код психомоторне епилепсије, шиљци који су потиснути у будном стању појављују се у предњим деловима темпоралних режњева током сна [7,8].

4.3. Функционална магнетна резонанца

Функционална магнетна резонанца (fMRI) је широко коришћена техника за испитивање функције мозга, иако механизми на основу којих се производе информације нису у потпуности схваћени. Експеримент fMRI зависи од техника и методологија развијених у различитим дисциплинама, што га чини мултидисциплинарним. За клиничке примене, једноставно мапирање критичних сензорних и моторичких функција може се лако извршити са субјектима који леже у отвору магнета где обављају једноставне задатке или доживљавају сензорне стимулусе у блоковима. Ово је примарни приступ за процену мозга пацијената пре неурохирургије или радиотерапије. У неколико центара развијени су стандардни протоколи који омогућавају ефикасно мапирање слушних, визуелних, моторичких и језичких подручја како би се хирурзи информисали о положајима критичних функционалних подручја. fMRI подаци се лако могу интегрисати са неурохируршким процедурама вођеним сликом [9].

4.4. Магнетоенцефалографија

Магнетоенцефалографија (MEG) је неинвазивна техника која може прецизно да сними динамичке просторно-временске обрасце мозга мерењем магнетних поља која настају услед неуронске активности у милисекундама. Посматрања динамике мозга коришћена су у когнитивној неуронауци, дијагнози неуролошких болести и интерфејсу мозак-рачунар (BCI) [10].

4.5. Структурне технике

Поделу између структурног и функционалног снимања је тешко направити јер су структура и функција често нераскидиво испреплетене у мозгу. Дефиниције функционалног снимања су различите и често широке и увек ће бити произвољне до одређене мере. На основу биолошких разматрања, функционално снимање се може сматрати методом која пружа динамичке физиолошке информације, док структурно снимање пружа статичке анатомске информације [11].

4.6. Компјутерска томографија

Током последњих деценија, сведоци смо сталног раста броја прегледа компјутеризованом томографијом (CT). Нови технолошки развој, шира доступност потребног хардвера и софтвера, као и захтеви лекара и пацијената, главни су разлози за повећану клиничку примену CT-а. Иако се магнетна резонанца изузетно развила током последњих деценија, посебно за снимање главе, и постала је доступнија, CT је и даље основна метода снимања главе за вишеструке индикације, укључујући CT без контраста (NCCT) код церебралне исхемије и можданог удара, процену

интракранијалног крварења (ICH), главобоље или акутне неуролошке дефиците, као и за дијагностику прве линије код губитка свести и процене трауме у хитним случајевима. Стога је CT главе неопходан за брзу и тачну дијагнозу, оптимизовано управљање пацијентима и лечење. Поред магнетне резонанце, која се генерално користи у мање акутним клиничким условима, компјутерска томографија чини велики део дневног неурорадиолошког оптерећења у снимању главе [12].

4.7. Иновативне и хибридне методе

Тим са Станфорд универзитета развио је нови алгоритам вештачке интелигенције – топографску дубоку вештачку неуронску мрежу (TDANN) – која користи само два правила: натуралистичке сензорне улазе и просторне услове на везама. За разлику од конвенционалних неуронских мрежа, TDANN укључује просторне услове, распоређујући своје виртуалне неуроне на дводимензионалном "кортикалном листу" и захтевајући да суседни неурони деле сличне одговоре на сензорне улазе. Како је модел учио да процесуира слике, ова топографска структура је довела до формирања просторних мапа, реплицирајући начин на који се неурони у мозгу организују као одговор на визуелне стимулансе [13].

5. КЛИНИЧКЕ ПРИМЕНЕ

Мапирање мозга отворило је важне перспективе за неурофизиолошку евалуацију пацијената, дискриминацију ефеката лекова на мозак и проучавање односа између мозга и понашања. У последњим годинама, уз појаву рачунарске анализе EEG-а, појавила се нова технологија која обећава да ће променити области неурологије, психијатрије, психофармакологије и неуропсихијатрије: мапирање мозга.

5.1. Епилепсија

Епилепсија је хронични неуролошки поремећај дефинисан појавом најмање два непровоцирана напада у размаку од више од 24 сата, који су резултат абнормалне прекомерне или синхроне неуронске активности у мозгу. У хитним случајевима, када пацијент има новонастале нападе, CT главе без контраста је погодан за дијагнозу или брзо искључивање неколико животно угрожавајућих стања, као што су епидурални хематом или субарахноидално крварење. *MRI* захтева више времена и стога је мање погодан за ове патологије у акутном стању. fMRI се углавном користи у преоперативној евалуацији пацијената са епилепсијом отпорном на лекове како би се локализовале елоквентне области мозга, као што су језик и моторни кортекси [14].

5.2. Артериовенозне малформације

Артериовенска малформација (AVM) је абнормални сплет проширених крвних судова који ствара директну везу између артерија и вена, заобилазећи капиларну мрежу и реметећи нормалан проток крви. Конвенционална церебрална ангиографија је златни стандард у процени ангиоархитектуре AVM, док друге методе снимања које се користе за процену симптома који нису специфични за AVM укључују CT, CT ангиографију, MRI и магнетну резонантну ангиографију. Свака техника снимања нуди своју јединствену снагу: CT пружа боље васкуларне детаље AVM, док магнетна резонанца пружа бољу визуелизацију околних структура поред нидуса. Штавише, MRI може да детектује тромбозиране крвне судове као хиперинтензивне сигнале и покаже свако повезано крварење у различитим фазама еволуције [15].

5.3. Тумори

Тумор на мозгу је раст абнормалних ћелија у ткивима мозга, које могу бити бенигне (неканцерозне) или малигне (канцерозне). У стварној клиничкој пракси, конвенционална магнетна резонанција је први тест за пацијенте са сумњом на глиом. MRI пружа прелиминарне информације о тумору, укључујући локацију, величину и границе тумора. PET-CT снимање је од виталног значаја за функционално снимање у дијагнози глиома. У комбинацији са анатомским информацијама које пружа конвенционална магнетна резонанца, PET-CT пружа важну основу за осетљивији третман глиома. Међутим, осетљивост на CT прегледу за мале туморе је прилично ниска [16].

5.4. Неуродегенеративне болести

Неуродегенеративне болести су хетерогена група хроничних, прогресивних поремећаја које карактерише постепени губитак структуре или функције неурона, са последичном дисфункцијом нервног система. Најчешће неуродегенеративне болести укључују алцхајмерову болест, паркинсонову болест, амиотрофичну латералну склерозу (ALS) и хантингтонову болест, а свака од њих укључује селективну рањивост специфичних популација неурона. Нова технологија у снимању донела је велику промену у снимању мозга и била је корисна у раном откривању, као и праћењу неуродегенеративних болести. Међу техникама, позитронска емисиона томографија, функционална магнетна резонанца и дифузионо тензорско снимање (DTI) могу се сматрати најнапреднијим. Све ове технике пружају информације о структурној и функционалној организацији мозга и помажу у откривању раних промена које се јављају пре манифестације болести [17].

6. ИЗАЗОВИ И ОГРАНИЧЕЊА

Упркос брзом развоју техника снимања структура мозга високе резолуције и велике запремине, бројна методолошка и техничка ограничења и даље представљају значајне изазове за поуздано аутоматизовано мапирање мозга. Код микроскопије и метода снимања високе резолуције, чак и мање разлике у припреми ткива, бојењу, сечењу и подешавањима инструмената могу довести до значајних варијација у квалитету слике, артефаката и губитка релевантних региона од интереса. Ови фактори чине примену аутоматизованих алгоритама посебно тешком и смањују тачност класификације и анализе. Још један проблем је ограничено видно поље код снимања високе резолуције, што често резултира непотпуним

покривањем запремине мозга и компликује регистрацију узорака са референтним мозговима. Иако постоје методе интерполације и импутације недостајућих података, оне уносе додатне неизвесности у анализу. Код функционалног неуроимиџинга, посебно код функционалне магнетне резонанце (fMRI), артефакти покрета су значајан извор грешака, посебно код пацијената са неуролошком дисфункцијом који имају потешкоћа да остану мирни или поуздано обављају задатке током снимања.

7. БУДУЋНОСТ

Како се приближава ера великих података (*big data*), један све већи фокус је на хармонизацији неуроимиџинга, когнитивних и клиничких мера у различитим институцијама, истраживачким групама и узорцима. Један важан циљ је повећање разумевања начина на који повезаност можданих мрежа подржава когнитивне процесе, међутим, способност да се обједине подаци из различитих узорака како би се спровеле анализе у стилу великих података је ограничена ако метод за процену когниције није стандардизован у свим студијама. Са растућим прихватањем RDoC приступа, уложени су напори да се идентификују специфични неурокогнитивни задаци који испитују когнитивне домене од интереса [18]. Биолошки фактори могу имати дубок утицај на развојне студије и важно је размотрити како се могу укључити у будуће студије деце и адолесцената.

8. ЗАКЉУЧАК

Крајњи закључак овог рада је да се мапирање мозга не може схватити као статички процес, нити се може једноставно повезати са функцијом са одређеним можданим регионима. Већина можданих функција је резултат интеракције дистрибуираних мрежа, чија организација варира у зависности од задатка, стања и индивидуалних разлика. Стога, без одговарајућег теоријског оквира, чак ни технике са високом просторном или временском резолуцијом не могу гарантовати свеобухватније разумевање можданих процеса.

9. ЛИТЕРАТУРА

[1] R. A. Poldrack, J. A. Mumford and T. E. Nichols, Handbook of Functional MRI Data Analysis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.

[2] R. D. Fields, “White matter matters,” Scientific American, vol. 298, no. 3, pp. 54–61, 2008.

[3] A. M. Helmenstine, “Parts of the brain and their functions,” ScienceNotes.org, https://sciencenotes.org. [Приступљено Dec. 23, 2025].

[4] R. D. Markello, J. I. Hansen and Z.-Q. Liu, “Neuromaps: Structural and functional interpretation of brain maps,” bioRxiv, 2022.

[5] J. Maier, P. Tewarie, A. Hillebrand, L. Douw, B. W. van Dijk, S. M. Stufflebeam and P. Van Mieghem, “Mapping the structural core of human brain networks to functional connectivity,” Brain Connectivity, vol. 6, no. 4, pp. 298–311, 2016.

[6] O. Gosseries, A. Demertzi, Q. Noirhomme, J. Tshibanda, M. Boly, M. Op de Beeck, R. Hustinx, P. Maquet, E. Salmon, G. Moonen, A. Luxen, S. Laureys and X. De Tiège, “Functional neuroimaging (fMRI, PET and MEG): What do we measure?” Revue Médicale de Liège, vol. 63, no. 5–6, pp. 231–237, 2008.

[7] G. R. Müller-Putz, “Electroencephalography,” in Handbook of Brain–Computer Interfaces. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018, pp. xxx–xxx.

[8] A. B. Bindman, A. Chattopadhyay, D. H. Osmond, W. Huen and P. Bacchetti, “Effect of managed care on preventable hospitalization rates in California,” Health Services Research, vol. 40, no. 1, pp. 19–38, 2005.

[9] N. K. Logothetis, “Principles and applications of functional magnetic resonance imaging in the human brain,” Journal of Clinical Investigation, vol. 125, no. 3, pp. 123–132, 2015.

[10] A. L. Fred et al., “A concise introduction to magnetoencephalography (MEG) and its clinical applications,” Brain Sciences, vol. 12, no. 6, Art. no. 756, 2022.

[11] J. Ashburner and K. J. Friston, “Unified segmentation,” NeuroImage, vol. 26, no. 3, pp. 839–851, 2005.

[12] M. Dickmeier, N. Sollmann, K. Kupfer et al., “Computed tomography of the head,” Clinical Neuroradiology, vol. 33, pp. 591–610, 2023.

[13] V. Ramachandran, “Neuroscientists use artificial intelligence to simulate how the brain understands the visual world,” Stanford Neurosciences Institute, May 28, 2024.

[14] A. M. Goodman and J. P. Szaflarski, “Recent advances in neuroimaging of epilepsy,” Neurotherapeutics, vol. 18, no. 2, pp. 811–826, 2021.

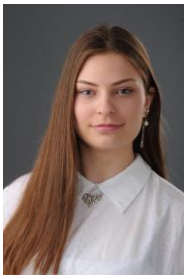
[15] N. Ajiboye et al., “Cerebral arteriovenous malformations: Evaluation and management,” Scientific World Journal, vol. 2014, Art. no. 649036, 2014.

[16] A. A. Pruitt, “Brain metastases: Neuroimaging,” in Handbook of Clinical Neurology, vol. 149. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018, pp. 89–112.

[17] S. K. Chandrasekar et al., “Advanced imaging techniques (PET, fMRI, DTI) in early detection of neurodegenerative diseases: A systematic review,” Health Science Reports, early access, 2025.

[18] L. Q. Uddin and K. H. Karlsgodt, “Future directions for examining brain networks in neurodevelopmental disorders,” Journal of Clinical Child & Adolescent Psychology, vol. 47, no. 3, pp. 483–497, 2018.

Кратка биографија:



Адријана Сокнић рођена је у Новом Саду 2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Биомедицинског инжењерства – Мозак-рачунар интерфејс одбранила је 2026. год.
Контакт: adrijanasoknic9@gmail.com

Зборник радова факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.311.243
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35UI01Misura

Одржавање кровних фотонапонских електрана

Maintenance of Rooftop Photovoltaic Power Plants

Николета Мишура, Золтан Чорба, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм: ЧИСТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Кратак садржај – *У овом раду анализирано је одржавање кровних ФН електрана. Дефинисан је програм прегледа, чишћења, мониторинга, безбедности и радни показатељи ради повећања поузданости, производње и економске исплативости.*

Кључне речи: *Кровне фотонапонске електране, одржавање и управљање, поузданост, мониторинг*

Abstract – *In this master's paper, the O&M system of rooftop PV power plants is analyzed, and an inspection, cleaning, monitoring, safety, and key performance indicators program is defined to improve reliability, energy yield, and economic profitability.*

Keywords: *Rooftop PV power plant, Operation and maintenance, Key performance indicators*

НАПОМЕНА: Овај рад је проистекао из мастер рада чији је ментор био др Золтан Чорба, ванр. проф.

1. УВОД

Соларна енергија представља један од најважнијих и најчистијих обновљивих извора, а фотонапонски (ФН) системи омогућавају њену директну конверзију у електричну енергију путем ФН ћелија [1]. Иако имају бројне предности, перформансе ФН система зависе од више фактора, при чему је запрљање панела један од кључних узрока пада производње и економских губитака, а може довести и до „врућих тачака“ (hot spots) и убрзане деградације [2]. Зато су редовно одржавање и чишћење неопходни, јер могу повећати принос и продужити век система, посебно код кровних електрана где приступ и безбедност имају посебан значај [3]. Циљ рада је анализа проблема запрљања, деградације и приказ препорука добре праксе за одржавање кровних ФН електрана.

2. ЕЛЕМЕНТИ КРОВНЕ ФОТОНАПОНСКЕ ЕЛЕКТРАНЕ

Кровна фотонапонска (ФН) електрана састоји се од више повезаних компоненти које омогућавају производњу и безбедан пренос електричне енергије (слика 1): ФН панели, носећа конструкција, ДЦ каблови, конектори, ДЦ/АЦ разводни ормари, inverter, мерење и мониторинг, као и заштита од пренапона/грома и уземљење [2].

ФН панели (различитих технологија: моно, поли, танкослојни, бифацијални, PERC, TOPCon, HJT) имају bypass диоде које смањују ризик од „hot-spot“ ефекта, а њихова ефикасност зависи од параметара попут снаге, напона/струје и температуре [5].



Слика 1 Елементи кровне ФН електране

Конструкција се бира према типу крова и мора издржати ветар, снег и корозију, док ДЦ део (каблови/конектори) захтева квалитетне спојеве због ризика од кварова и пожара [2].
Инвертер претвара једносмерни (ДЦ) напон у наизменични (АЦ) напон и оптимизује рад система (string, микро, хибридни, off-grid итд.), АЦ део омогућава прикључак на мрежу по правилима оператора, мониторинг прати производњу, а пренапонска заштита (SPD) и правилно уземљење штите опрему од пренапона и удара грома. Смарт метар мери токове енергије и може омогућити „zero-export“ режим (нема слања енергије у мрежу) [3].

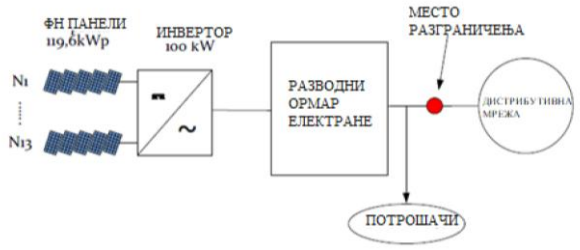
3. ПРИМЕР КРОВНЕ ФОТОНАПОНСКЕ ЕЛЕКТРАНЕ СНАГЕ 100kW

Приказан је пример кровне ФН електране називне излазне снаге 100 kW, димензионисане тако да усклади захтеве инвеститора, услове прикључења и могућности објекта. У табели 1 приказани су основни подаци пројектованог ФН система, појединачна снага, број и снага ФН панела и инвертора.

Табела 1 Основни подаци о електрани

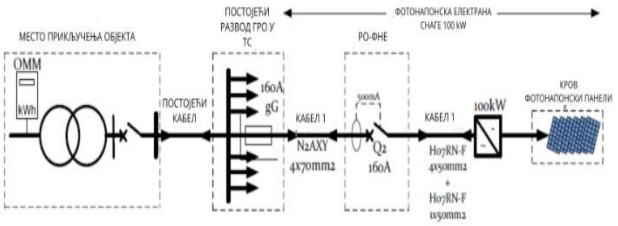
Номинална излазна снага ФН електране 100kW					
Номинална улазна снага ФН електране (номинална снага ФН панела) 115kWp					
Инвертор			ФН панели		
Појединачна снага	Број	Укупна снага	Појединачна снага	Број	Укупна снага
[kW]	Ком.	[kW]	[Wp]	Ком.	[kWp]
100	1	100	460	250	115

Систем је пројектован са једним стринг инвертером снаге 100kW, док је ФН панел снаге 460 Wp. Панели се монтирају на кров од трапезастог лима помоћу алуминијумске конструкције. Блок шема је приказана на слици 2.

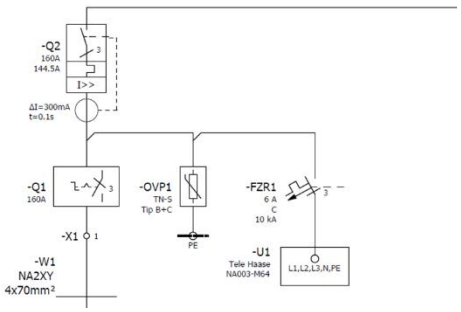


Слика 2 Блок шема ФН електране

ДЦ део је изведен кроз повезивање панела у стрингове који се доводе на МППТ улазе invertera ради оптималног рада, а АЦ део обухвата прикључење преко постојећег развода уз одговарајуће каблове, прекидаче и заштите (главна склопка, пренапонска заштита, прекидач 160 А са диференцијалном заштитом), као и мрежни заштитни релеј Tele Haase NA003-M64 за надзор напона, фреквенције и antiostrvcky заштиту [3]. На слици 3 је дата блок шема наизменичног струјног кола, а на слици 4 део једнополне шеме, улазно нисконапонско коло.



Слика 3 Блок шема наизменичног струјног кола



Слика 4 Улазно нисконапонско коло

4. ПРЕПОРУКЕ У ОДРЖАВАЊУ КРОВНИК ФОТОНАПОНСКИХ ЕЛЕКТРАНА

Правилно одржавање кровних фотонапонских електрана је кључно за стабилну производњу, безбедност и дугорочну исплативост, јер приступ „инсталирај и заборави" води паду перформанси, застојима и већим трошковима. Систем одржавања и управљања (O&M - Operation & Maintenance) смањује техничке и финансијске ризике, снижава цену електричне енергије, повећава период отплате инвестиције, продужава век опреме и обезбеђује усклађеност са регулативом и гаранцијама [2].

4.1 Стратегија одржавања

Стратегија одржавања обухвата следеће елементе:

Предиктовно (анализа података за прогнозу кварова планирање интервенција; може смањити трошкове 10–40%, али тражи напредан мониторинг).

- Одржавање засновано на ризику (фокус на критичне компоненте и оптималан однос трошка и ризика).
- Превентивно (временски или према стању; редовне инспекције, али може довести до непотребних трошкова без доброг критеријума).
- Коративно (после квара; скупо због губитка производње; интервенције од једноставних рестартова до сложених сервиса).
- Ванредно/реактивно (после олуја, града, пожара, поплава; најскупље и са дугим застојима) [3].

4.2 Специфичност одражвања кровних ФН система

Специфичности кровних система су рад на висини, тежи приступ, близина људи, чешће сенчење и већи релативни трошкови интервенција, па се наглашава поуздан мониторинг и добра даљинска дијагностика [4].

Препоручена динамика прегледа по компонентама:

- Конструкција: визуелно 6 месеци; механички 1× годишње; дотезање и антикорозија по потреби.
- Панели: визуелно квартално; термовизија 1× годишње; I–V мерења на ~2 године; чишћење 2–4× годишње према губицима.
- ДЦ каблови/конектори: визуелно квартално; термовизија и изолација 1× годишње; замена при оштећењу или прегревању.
- Инвертер: мониторинг месечно; физички преглед квартално; сервис годишње; вентилатори 3–5 годишње, инвертер 10–15 година.
- Развод и заштите: месечна контрола; квартално затезање/чистоћа; годишње термовизија и тест заштита; SPD типично до 5 година или по индикатору.
- Громобранска инсталација и уземљење: 1× годишње, уземљење <10 Ω; контрола размака LPS–DC >50 cm.

- Смарт метар: комуникација месечно; провера/калибрација по потреби [5].

На слици 5 приказани су примери оштећења ДЦ конектора и инвертора.

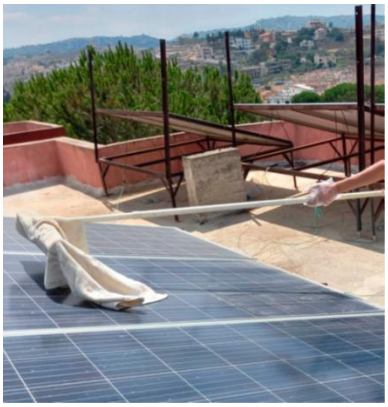


Слика 5 Оштећени ДЦ конектор и изгорели инвертер

4.3 Методе чишћења ФН панела

Постоји више метода чишћења ФН панела. Неки од њих су:

- природно (зависи од климе),
- ручно (скупо и ризично) (слика 6),
- машинско (ризик од оштећења),
- аутоматизовано (брисачи, млазнице, роботи),
- камионско (за велика поља уз услове простора) (слика7),
- дронови (без контакта, углавном прашина),
- самочишћење и хлађење (аутономно), самочистећи премази (уз ограничења),
- електростатичко – без воде, врло ефикасно у сувим условима, али скупље.



Слика 6 Ручно чишћење ФН панела



Слика 7 Камионско чишћење ФН панела

4.4 Показатељи и параметри за ефикасно управљање и одржавање ФН система

Ефикасно управљање и одржавање (O&M) фотонапонских електрана захтева континуирано праћење перформанси, трошкова и поузданости система. У ту сврху дефинишу се различити радни показатељи перформанси (KPI - Key Performance Indicators) који омогућавају:

- процену стања електране, идентификацију техничких и енергетских губитака,
- доношење оптималних одлука у процесу одржавања,
- праћење испуњења уговорних обавеза (O&M уговори, гаранције перформанси).

Енергетски индекс перформанси представља алтернативни приступ вредновању перформанси читавог система:

$$\boldsymbol{EPI} = \frac{\boldsymbol{Y}_{\text{meas}}}{\boldsymbol{Y}_{\text{exp}}} \quad (1)$$

где су:
$\boldsymbol{Y}_{\text{meas}}$– измерени принос,
$\boldsymbol{Y}_{\text{exp}}$– очекивани принос из модела.
Енергетски индекс упоређује измерени принос ФН електране са очекиваним приносом. IEC 61724-3 сатндард дефинише енергетску расположивост као однос енергије која би била очекивана у периодима када је електрана расположива и укупне очекиване енергије:

$$\boldsymbol{A}_{\text{energy}} = \frac{\boldsymbol{Y}_{\text{exp}} - \boldsymbol{Y}_{\text{unavailable}}}{\boldsymbol{Y}_{\text{exp}}} = \frac{\boldsymbol{Y}_{\text{exp,available}}}{\boldsymbol{Y}_{\text{exp,total}}} \quad (2)$$

где су:
$\boldsymbol{Y}_{\text{exp}}$ – укупно очекивани принос у посматрном периоду
$\boldsymbol{Y}_{\text{unavailable}}$ или $\boldsymbol{Y}_{\text{exp,loss}}$– очекивана изгубљена енергија због недоступности система,
$\boldsymbol{Y}_{\text{exp,available}}$– очекивана енергија у периодима када је систем био доступан.

4.5 Безбедносни аспекти монтаже ФН система на објектима

Фотонапонске електране, без обзира да ли су постављене на тлу или на објекте, представљају електроенергетска постројења са значајним безбедносним ризицима. Основне групе ризика укључују:

- електрични удар (ДЦ и АЦ кола),
- пад са висине,
- пожар,
- механичке повреде,
- неповољни временски услови (ветар, лед, снег, екстремне температуре),
- животиње (глодари, птице, инсекти),
- хемикалије (чистачи, пестициди, хербициди).

Пожарна заштита мора бити пројектована тако да омогући безбедну интервенцију ватрогасаца.
За системе снаге веће од 30 kW:

- препоручује се ватрогасна инспекција,
- присуство ватрогасаца на пуштању у рад,
- израда специјалног плана поступања за ватрогасце.

Мора постојати јасна документација:

- положај АЦ и ДЦ ормара,
- положај заштите диференцијалне струје,
- положај инвертора,
- положај "против-пожарног прекидача",
- положај разводног ормара, приступи крову, пролази и зоне опасности [6].

4.6 Управљање резервним деловима

Управљање резервним деловима (Spare Parts Management) један је од кључних елемената за смањење застоја и обезбеђење високе расположивости кровних ФН система. Добра пракса је да резервни делови формално припадају власнику електране, док је O&M сервисер одговоран за њихово складиштење, услове чувања, евиденцију потрошње и благовремено допуњавање [5].

4.7 Подаци мониторинг и сајбер-безбедност

Савремени O&M за кровне ФН системе у великој мери зависи од доброг мониторинга, јер омогућава да се кварови и пад производње уоче на време. Типичан систем мониторинга обухвата логер података који прикупља информације са инвертора, енергетских бројила, сензора сунчевог зрачења (пиранометар), температуре панела, као и са локалне метеоролошке станице. Пожељно је да логер има меморију за најмање један месец података, са временском резолуцијом до 15 минута. Подаци се затим приказују преко веб портала или SCADA платформе, где се прате графици, аларми и извештаји. Отворени интерфејси додатно олакшавају интеграцију са аналитичким алатима и прелазак на друге платформе.

4.8 Циркуларна економија и крај животног века

Како број ФН панела расте, расте и проблем опреме на крају животног века. O&M се зато све више ослања на циркуларну економију: продужење употребе, поправка и поновна употреба, реупотреба панела у мање захтевним условима и рециклажа.
Крај животног века и циркуларност подразумева планирање поправке, поновне употребе и рециклаже, праћење опреме кроз цео животни циклус и избор конструкције која олакшава демонтажу и замену [4].

5. ЗАКЉУЧАК

Одржавање кровних ФН електрана је кључно да систем током целог радног века испоручује планирану енергију уз минималне застоје и контролисане трошкове. Због специфичности кровова (приступ, простор, нагиб и безбедност рада), O&M мора бити прилагођен објекту, јер приступ „инсталирај и заборави" доводи до пада перформанси, застоја и већих трошкова. Систематичан програм прегледа обухвата панеле и конструкцију, ДЦ каблове, конекторе, инвертор, разводне ормане као и мониторинг, уз праћење радних показатеља ради ране детекције кварова и деградације. Савремени O&M се ослања на податке, даљински надзор и сајбер-безбедност (контрола приступа, шифрована комуникација, ажурирања), док дронови, термовизија и вештачка интелигенција подижу одржавање ка предиктивном и смањују непотребне интервенције. Заштитта на раду је основа свих активности (рад на висини, електрични ризици, пожар), а будућност O&M укључује циркуларну економију кроз поправку, поновну употребу и рециклажу опреме. Квалитетан O&M смањује ризике, снижава цену електричне енергије, побољшава период отплате инвестиције и продужава век опреме, па је стратешки важан део животног циклуса кровних ФН система.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Anitha Shaju; Rani Chacko, „Soiling of photovoltaic modules- Review'', IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bristol, UK, 2018.

[2] Javed, Wasim, and Bing Guo. Laboratory calibration of a light scattering soiling sensor. Sol. Energy 236 (2022)

[3] MCS: *Guide to the Installation of Photovoltaic Systems*, London, 2012.

[4] Barkhouse DAR, Gunawan O, Gokmen T, Todorov TK, Mitzi DB. Identification of technical risks in the photovoltaic value chain and quantification of the economic impact. Prog Photovolt, Res Appl 2015;20(1):6–11

[5] Rediske G, Michels L, Cezar Mairesse Siluk J, Donaduzzi Rigo P, Brum Rosa C, Jochann Franceschi Bortolini R. Management of operation and maintenance practices in photovoltaic plants: Key performance indicators. Int J Energy Res 2022;46(6):7118–36

[6] Технички документ 73822 – Фотонапонски с истеми и његове компоненте 2021

Кратка биографија:



Николета Мишура рођена је у Сремској Митровици 2001. године. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Енергетских технологија – Утицај запрљања на карактеристике фотонапонских панела – одбранила је 2024. год.
Контакт: misuranikoleta@gmail.com



др Золтан Чорба докторирао је на Факултету техничких наука 2016. год., а од 2021. је у звању ванредни професор. Област интересовања су фотонапонски системи и други обновљиви извори енергије.

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 697:628.8/.9
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35UI02Lazic

Анализа и оптимизација ВРФ система у стамбеном објекту помоћу софтверског алата *Bosch AirSelect*

Analysis and Ooptimization of a VRF System in a Residential Building Using the Bosch AirSelect Software Tool

Ксенија Лазић, Игор Мујан, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ЧИСТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Кратак садржај – *У раду је приказана анализа и оптимизација варијабилног фреонског (ВРФ) система климатизације за једнопородични стамбени објекат у Београду. Теоријски су описана димензионисања фреонских цевовода, значај правилног избора опреме и примену софтверских алата у процесу пројектовања. Прорачун и валидација система извршени су применом софтвера Bosch Air Select, који је омогућио проверу капацитета, дужина цевовода и висинских разлика. Резултати анализе показали су благо преоптерећење спољне јединице, на основу чега је предложена оптимизација система избором снажније спољне јединице. Техно-економском анализом је утврђено да предложено решење обезбеђује већу поузданост, стабилнији рад и побољшану енергетску ефикасност система у дугорочној експлоатацији*

Кључне речи: *ВРФ систем, фреонски цевоводи, енергетска ефикасност, Bosch AirSelect*

Abstract – *The paper presents the analysis and optimization of a variable frequency (VRF) air conditioning system for a single-family residential building in Belgrade. Special emphasis is placed on the theoretical foundations of the dimensioning of freon pipelines, the importance of proper equipment selection and the application of software tools in the design process. The calculation and validation of the system were performed using the Bosch Air Select software, which enabled checking of capacity, pipeline length and height differences. The results of the analysis showed a slight overload of the outdoor unit, based on which optimization of the system was proposed by selecting a more powerful outdoor unit. The techno-economic analysis determined that the proposed solution provides greater reliability, more stable operation and improved energy efficiency of the system in long-term operation*

Keywords: *VRF system, freon piping, energy efficiency, Bosch Air Select*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Игор Мујан, доцент

1. УВОД

Савремени захтеви у области грејања, вентилације и климатизације (КГХ) усмерени су ка постизању високог нивоа комфора уз истовремено смањење потрошње енергије и негативног утицаја на животну средину. Пораст цена енергената и све строжији прописи у области енергетске ефикасности условили су развој напредних климатизационих система који омогућавају флексибилан и ефикасан рад у објектима са променљивим термичким оптерећењима.

Варијабилни фреонски системи (*Variable Refrigerant Flow* – ВРФ) представљају једно од најсавременијих решења у области КГХ инсталација. Основни принцип њиховог рада заснива се на регулацији протока расхладног флуида у складу са стварним потребама појединачних просторија, чиме се постиже висока енергетска ефикасност, стабилни микроклиматски услови и продужен радни век опреме. За разлику од традиционалних система, ВРФ системи омогућавају индивидуалну контролу по зонама, што их чини посебно погодним за објекте са сложеном структуром и променљивим оптерећењима.

Иако су ВРФ системи дуго били доминантно примењивани у пословним и комерцијалним објектима, последњих година све чешће се користе и у стамбеним објектима. Разлог томе су растући захтеви за већим комфором, тихим радом система, компактним димензијама опреме и могућношћу прецизне контроле температуре у свакој стамбеној јединици. Пројектовање ВРФ система представља сложен инжењерски задатак који захтева прецизну анализу топлотних оптерећења, правилан избор опреме и оптимално димензионисање цевног развода.

Примена специјализованих софтверских алата има кључну улогу у процесу пројектовања. Софтверски алат *Bosch AirSelect* омогућава инжењерима поуздан избор, анализу и оптимизацију ВРФ система, уз проверу техничких ограничења и енергетских показатеља рада.

Предмет овог рада је анализа и оптимизација ВРФ система у стамбеном објекту применом софтверског алата *Bosch AirSelect*, са циљем да се прикаже значај софтверске подршке у постизању енергетски ефикасног, технички исправног и оптималног пројектног решења.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ДИМЕНЗИОНИСАЊА И ОПТИМИЗАЦИЈЕ

Димензионисање фреонских цевовода у ВРФ системима представља један од значајних инжењерских задатака у процесу пројектовања, јер директно утиче на енергетску ефикасност, стабилност рада и дугорочну поузданост система. ВРФ инсталације карактеришу велике укупне дужине цевовода, бројна гранања и промењљиви режими рада, услед чега прорачун мора да обухвати више међусобно повезаних физичких појава.

Основни полазни параметар за димензионисање цевовода јесте масени проток расхладног флуида, који је условљен потребним расхладним или грејним капацитетом унутрашњих јединица. На основу масеног протока дефинише се брзина струјања расхладног медијума у цевима, при чему она мора бити довољно велика да обезбеди поуздан повратак компресорског уља које се, као неизбежна последица подмазивања компресора, преноси заједно са расхладним медијумом, али истовремено ограничена како би се избегли прекомерни падови притиска, повећана бука и негативни хидраулички ефекти. Због тога димензионисање цеви у ВРФ системима не представља искључиво хидраулички, већ и функционални компромис између више критеријума. Пад притиска у фреонским цевоводима састоји се од губитака услед трења дуж цеви, локалних губитака на коленима, гранањима и арматури, као и статичке компоненте условљене висинским разликама у систему. Прекомерни падови притиска доводе до снижења температуре испаравања и смањења расположивог капацитета унутрашњих јединица, што негативно утиче на укупне перформансе система. Из тог разлога, у пројектовању ВРФ система примењују се строго дефинисана ограничења у погледу максимално дозвољених дужина цевовода и висинских разлика.

Посебан значај у анализи ВРФ цевоводних мрежа има транспорт компресорског уља. Иако је већина уља задржана у компресору помоћу сепаратора, одређена количина уља неизбежно циркулише заједно са расхладним флуидом. Уље се транспортује у виду диспергованих капљица у гасној фази, а њихово кретање зависи пре свега од локалне брзине струјања. Уколико брзина падне испод минималних вредности, долази до задржавања уља у цевима, повећања хидрауличког отпора и смањења енергетске ефикасности система.

У разгранатим ВРФ мрежама посебно је изражен утицај хидродинамике гранања. Расподела масеног протока и уља између појединих грана зависи од њихових хидрауличких отпора, због чега је примена специјално обликованих Y-рачви од кључног значаја. Y-рачве омогућавају равномернију расподелу протока, смањују турбуленцију и ризик од сепарације фаза у поређењу са класичним T-комадима. Правилан положај и оријентација ових елемената имају директан утицај на стабилност рада унутрашњих јединица и поуздан повратак уља у компресор.

Сви наведени физички и хидраулички принципи интегрисани су у пројектантске препоруке произвођача ВРФ система, које обухватају табеларне вредности дозвољених пречника цеви, максималних дужина и висинских разлика.

Примена специјализованих софтверских алата омогућава да се ови сложени процеси обједине у јединствен модел, чиме се обезбеђује технички исправно и оптимизовано пројектно решење.

3. ОПИС ОБЈЕКТА

Анализа и оптимизација ВРФ система у овом раду спроведена је на примеру једнопородичног стамбеног објекта спратности По + П + 1, који се налази на територији града Београда. Пројектовање је извршено на основу стварне архитектонско-грађевинске документације, што омогућава реалистичан приказ услова експлоатације и поуздану процену перформанси система.

Спољни пројектни климатски услови усвојени су у складу са важећим стандардима за локацију Београд, при чему су за зимски режим рада узете минималне температуре до −12,1 °C, а за летњи режим максималне температуре до +35 °C. Унутрашњи пројектни услови дефинисани су у складу са наменом просторија и захтевима комфора, са температурама од 20–22 °C у зимском и 24–26 °C у летњем периоду, док су у санитарним просторијама предвиђене нешто више пројектне температуре.

Објекат обухвата стамбене просторије различите намене распоређене на три етаже, што условљава неуједначена термичка оптерећења и потребу за зонском регулацијом. Због тога је као оптимално решење изабран ВРФ систем компаније *Bosch*, који се састоји од једне спољне јединице и више унутрашњих јединица различитих капацитета, распоређених у складу са функционалном организацијом простора.

Пројектовани ВРФ систем предвиђен је за рад у широком температурном опсегу, од −20 °C у режиму грејања до +52 °C у режиму хлађења, уз могућност индивидуалне регулације сваке унутрашње јединице. Фреонски цевоводни развод изведен је унутар објекта, у спуштеним плафонима и зидовима, уз примену термичке изолације у складу са препорукама произвођача. Оваква конфигурација система омогућава флексибилан рад, повећан комфор корисника и добру основу за даљу анализу и оптимизацију помоћу софтверског алата *Bosch AirSelect*.

4. ЗНАЧАЈ СОФТВЕРСКИХ АЛАТА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ДИЗАЈНА И ПОТРОШЊЕ ЕНЕРГИЈЕ

У савременом пројектовању КГХ система софтверски алати представљају незаменљиву подршку, омогућавајући прецизне прорачуне, симулације и анализе које побољшавају технички квалитет пројекта и смањују ризик од грешака. Њихова употреба директно утиче на оптимизацију протока ваздуха, потрошње енергије и дугорочне трошкове објекта.

Пример оваквог алата је *Bosch Air Select*, који инжењерима омогућава брзо и тачно одређивање оптималних параметара ВРФ система на основу улазних података као што су проток ваздуха,

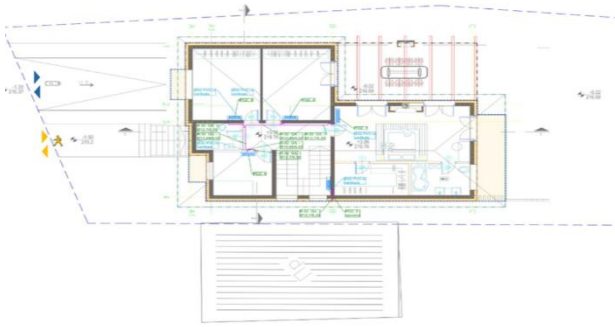
температура, запремина простора и топлотна оптерећења. Софтвер пружа детаљан технички извештај и омогућава поређење различитих варијанти решења, што олакшава избор опреме и оптимизацију енергетске ефикасности.
Примена ових алата омогућава идентификацију потенцијалних проблема пре извођења радова, смањује ризик од грешака и непланираних трошкова, као и оптимизацију енергетске потрошње у експлоатацији.
Практична примена показује да софтверске анализе могу смањити енергетске губитке и оперативне трошкове објекта и до 20–30%, кроз корекцију позиционирања улаза и излаза ваздуха, оптимизацију распореда осветљења или увођење сензора покрета. На овај начин, софтверски алати постају кључни савезници пројектанта, омогућавају уштеду ресурса и доприносе креирању одрживих и енергетски ефикасних решења.

5. ТЕХНИЧКИ ОПИС ПРОЈЕКТОВАНОГ ВРФ СИСТЕМА

Техничко решење ВРФ система у овом раду засновано је на резултатима прорачуна топлотних губитака и добитака, који представљају полазну основу за правилно димензионисање и избор опреме. Прорачун топлотних губитака спроведен је у складу са важећим стандардима за пројектовање система грејања, док је прорачун топлотних добитака обухватио све релевантне изворе оптерећења у летњем режиму рада, укључујући пренос топлоте кроз омотач објекта, соларне добитке и унутрашња оптерећења. За потребе анализе коришћени су подаци из постојеће пројектне документације реалног објекта, чиме је обезбеђена поуздана и реалистична основа за даљу оптимизацију система.
На основу добијених пројектних оптерећења извршен је избор унутрашњих и спољне јединице ВРФ система, уз поштовање техничких смерница произвођача и ограничења у погледу дозвољеног односа капацитета. Унутрашње јединице различитих капацитета распоређене су по просторијама у складу са њиховом наменом и термичким оптерећењима, што омогућава зонску регулацију и висок ниво корисничког комфора. Као спољна јединица одабрана је трофазна ВРФ јединица компаније *Bosch* номиналног капацитета 18 kW, која задовољава пројектне захтеве објекта у режимима грејања и хлађења.
Распоред унутрашњих јединица и конфигурација фреонског цевоводног развода пројектовани су у складу са претходно извршеним прорачунима и препорукама произвођача (Слика 1 и 2). Цевни развод реализован је као разграната мрежа са применом специјализованих Y-рачви, чиме су обезбеђени равномерна расподела масеног протока, стабилан транспорт компресорског уља и поуздан рад система у свим режимима оптерећења. Оваква конфигурација представља адекватну основу за даљу анализу и оптимизацију ВРФ система применом софтверског алата *Bosch AirSelect*.



Слика 1Распоред свих зидних унутрашњих јединица у објекту



Слика 2 Конфигурација цевног развода

6. АНАЛИЗА И ПРОРАЧУН ВРФ СИСТЕМА У СОФТВЕРУ *BOSCH AIR SELECT*

Анализа и димензионисање ВРФ система у овом раду извршени су применом софтверског алата *Bosch Air Select*, који омогућава интегрисани прорачун капацитета, цевног развода и валидацију система у складу са техничким ограничењима произвођача. Прецизан унос пројектних података представља основу за добијање поузданих резултата и правилно димензионисан систем.
У оквиру софтвера дефинисана је спољна ВРФ јединица номиналног хладног капацитета 18 kW (модел AF4300 A 18-3), која представља централни елемент система. Након тога унете су зидне унутрашње јединице и распоређене по просторијама објекта у складу са претходно израчунатим топлотним губицима и добицима. Подела објекта на приземље и спрат омогућила је јасну структурну организацију система и реалан приказ оптерећења по зонама.

Димензионисање цевног развода и прорачун капацитета

Један од најзначајнијих корака у анализи представља димензионисање цевног развода. Софтвер *Bosch Air Select* аутоматски генерише предлог разводне мреже на основу броја, капацитета и положаја унутрашњих јединица, узимајући у обзир препоручене пречнике цевовода, падове притиска и ограничења система. Пројектант има могућност да додатно коригује трасу у складу са архитектонским условима објекта.
Прорачун капацитета обухвата анализу односа збирног капацитета унутрашњих јединица и номиналног капацитета спољне јединице, као и корекције услед

дужина цевовода, конфигурације развода и истовременог рада више јединица. Овим приступом добија се реална слика о понашању система у различитим радним условима и потврђује се његова енергетска и функционална оправданост.



Слика 3Приказ унетих података у софтвер *Bosch Air Select*

Провера дозвољених дужина и висинских разлика

У наставку је извршена провера укупних дужина цевовода и висинских разлика у систему. Анализа је обухватила главне и секундарне трасе, као и еквивалентне дужине услед локалних отпора (колена, разводни елементи). Резултати показују да укупна ефективна дужина цевовода не прелази 300 m, што је у складу са максимално дозвољеним вредностима за изабрану конфигурацију.

Највећа висинска разлика у систему износи мање од 40 m, чиме су испуњени услови за безбедан рад компресора, правилан повратак уља и стабилну циркулацију расхладног флуида. Овим је потврђено да је систем у потпуности усклађен са техничким захтевима произвођача и да не постоје ограничења која би могла негативно утицати на поузданост рада.

Провера оптерећења система

Bosch Air Select аутоматски врши проверу укупног оптерећења система, при чему је утврђено да збирни капацитет унутрашњих јединица износи 112% номиналног капацитета спољне јединице. Иако софтвер ову вредност означава као упозорење, према техничкој документацији произвођача дозвољено је прекорачење капацитета до ±20%, што потврђује да систем може функционисати стабилно без потребе за додатним мерама.

Овај резултат илуструје флексибилност ВРФ технологије и могућност прилагођавања реалним условима рада, уз аутоматску регулацију протока расхладног флуида и заштиту компресора.

Извештај и валидација пројекта

Коначни извештај из софтвера представља свеобухватну техничку документацију која обухвата основне податке о пројекту, списак опреме, прорачун оптерећења, валидацију дужина и висинских разлика, као и дијаграме цевног развода и ожичења. Због непостојања Србије у бази климатских података софтвера, коришћена је алтернативна локација уз ручни унос пројектних температура за Београд, чиме је обезбеђена реалност резултата.

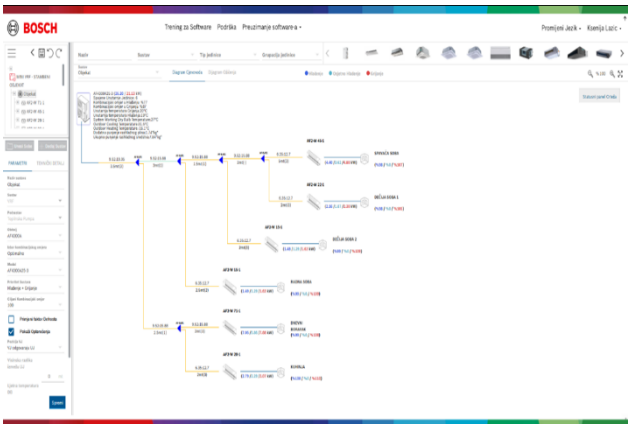
Овако генерисан извештај омогућава јасан увид у усклађеност свих компоненти система, представља основу за финалну пројектну документацију и значајно олакшава реализацију и касније одржавање ВРФ система.

7. РЕЗУЛТАТИ АНАЛИЗЕ И ПРЕДЛОГ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ВРФ СИСТЕМА

На основу извршене анализе и прорачуна у софтверу *Bosch Air Select*, извршена је детаљна оцена техничке исправности, оптерећења и енергетске ефикасности пројектованог ВРФ система за стамбени објекат. Анализа је омогућила идентификацију потенцијалних ограничења система, као и дефинисање мера за његову оптимизацију у циљу постизања дугорочно стабилног и поузданог рада.

Провером оптерећења утврђено је да збирни капацитет унутрашњих јединица износи 112% номиналног капацитета спољне јединице снаге 18 kW. Иако према техничким спецификацијама произвођача ВРФ системи дозвољавају одређени степен прекорачења капацитета, софтвер ову вредност евидентира као упозорење. Оваква конфигурација указује да би спољна јединица у условима максималног оптерећења могла радити близу горње границе својих радних могућности, што потенцијално доводи до повећаног оптерећења компресора, смањене енергетске ефикасности и краћег животног века опреме.

Иако систем у постојећој конфигурацији може функционисати без непосредних техничких проблема, анализа резултата показује да је радна резерва капацитета минимална. Оваква ситуација је прихватљива код мањих и мање захтевних објеката, али код стамбених објеката са високим захтевима за комфор и континуираним радом система представља потенцијални ризик у дугорочној експлоатацији. Због тога је било неопходно размотрити могућности оптимизације система.



Слика 4 Изглед цевног развода са измењеном спољном јединицом

Оптимизација избора спољне јединице

На основу добијених резултата, као оптимално решење предложена је замена постојеће спољне јединице AF4300 A 18-3 снаге 18 kW снажнијим моделом

AF4300 A 25-3, номиналног капацитета 25 kW. Овом изменом збирни капацитет унутрашњих јединица доводи се у потпуности у оквире препоручених вредности произвођача, чиме се елиминише стање преоптерећења и обезбеђује адекватна радна резерва система.

Предложена оптимизација не захтева никакве измене у погледу избора унутрашњих јединица, цевног развода нити управљачких елемената, јер је нова спољна јединица у потпуности компатибилна са постојећом конфигурацијом. Ово значајно поједностављује примену оптимизације и смањује потребу за додатним грађевинским или инсталационим интервенцијама.

Увођењем снажније спољне јединице постижу се бројне техничке предности: смањује се оптерећење компресора у пиковима рада, побољшава се стабилност температурних режима у свим просторијама и повећава укупна енергетска ефикасност система, јер јединица ради у оптималнијем радном подручју. Такође, елиминишу се сва упозорења која је софтвер идентификовао у првобитној конфигурацији, чиме се потврђује пуна усаглашеност система са препорукама произвођача.

Техно-економски осврт

Техно-економска анализа показује да оптимизована варијанта система подразумева повећање укупне инвестиције, које је искључиво последица веће цене снажније спољне јединице. Сви остали елементи система, укључујући унутрашње јединице, цевовод, електроинсталације и монтажне радове, остају непромењени.

Иако оптимизована конфигурација захтева већа почетна улагања, она доноси значајне дугорочне користи кроз повећану поузданост, мањи ризик од кварова, стабилнији рад у условима максималног оптерећења и потенцијално мање трошкове одржавања током експлоатације. Са аспекта одрживости и сигурности рада, предложено решење представља рационалан и технички оправдан избор.

Оптимизација избора спољне јединице значајно унапређује радне карактеристике пројектованог ВРФ система и доприноси његовој дугорочној енергетској и техничкој ефикасности.

8. ЗАКЉУЧАК

Прорачун је показао да збирни капацитет унутрашњих јединица (112%) прелази капацитет спољне јединице (18 kW), што смањује резерву капацитета и може повећати оптерећење компресора у пиковима. Предложена оптимизација подразумева замену спољне јединице моделом AF4300 A 25-3 (25 kW), што елиминише преоптерећење, повећава радну резерву, побољшава енергетску ефикасност и продужава век трајања система. Финансијски, оптимизована варијанта захтева веће почетно улагање, али обезбеђује дугорочну поузданост и флексибилност за будуће надоградње. Оптимизовани ВРФ систем у потпуности испуњава техничке и енергетске стандарде, обезбеђујући стабилан, ефикасан и сигуран рад у стамбеном објекту.

9. ЛИТЕРАТУРА

[1] ASHRAE Handbook — HVAC Systems and Equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 2016.

[2] Ma Z, Wang S. Variable Refrigerant Flow Systems: Design and Applications. Springer; 2015.

[3] Kriner D. Air Conditioning: The Development of Modern HVAC Systems. Springer; 2012.

[4] Bosch Climate Solutions. AirSelect Software Manual. Bosch Thermotechnik; 2022. Available from: https://www.bosch-thermotechnology.com

[5] Bosch AirSelect. Available from: https://www.bosch-airselect.com/#/

[6] Yau YH, Rajput UA, Badarudin A. A comprehensive review of variable refrigerant flow (VRF) and ventilation designs for thermal comfort in commercial buildings. J Therm Anal Calorim. 2024;149(5):1935 61.

[7] Daikin Industries Ltd. VRV/VRF Technical Manual. 2021.

[8] Pipe HPAR, Gas WE. Providing Fully Developed Flow for Waste Exhaust Gas at the Inlet Region of a Heat Pipe Air Recuperator. Global J Res Eng Civ Struct Eng. 2024;4(05).

Кратка биографија:



Ксенија Лазић, рођена је у Новом Саду 11.01.2002. Дипломски рад, на Факултету техничких наука, из области Заштите животне средине одбранила је 2024. године. Мастер рад из области Енергетике и процесне технике одбранила је 2025. године.
Контакт:
ksenijalazic02@gmail.com



Доцент др Игор Мујан рођен је у Новом Саду 1987. год. Докторирао је на Факултету техничких наука 2021. године. Од 2022. године је у запослен у звању доцента, на Катедри за топлотну технику, Департман за енергетику и процесну технику.

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.311.243
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35UI03Cvijic

Поређење софтверских решења за анализу носеће конструкције фотонапонских електрана

Comparison of Software Solutions for the Analysis of Photovoltaic Power Plant Support Structures

Марија Цвијић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм: ЧИСТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Кратак садржај – *Соларни системи су технички системи који користе енергију Сунчевог зрачења и претварају је у користан облик енергије, најчешће електричну или топлотну енергију.*
Лоше пројектована или неадекватно изведена носећа конструкција соларних система често представља један од кључних разлога због којих соларни системи нису искоришћени на оптималан начин и због чега се јављају различите техничке и енергетске неефикасности.
У овом раду софтвери K2 Base и ESDEC Calculator коришћени су као инжењерски алати за проверу и димензионисање носеће конструкције фотонапонског система, са посебним освртом на прорачун стабилности конструкције са бетонским стопицама (баластима) на равним крововима.

Кључне речи: *Соларни системи, K2 Base, ESDEC, статика, носећа конструкција.*

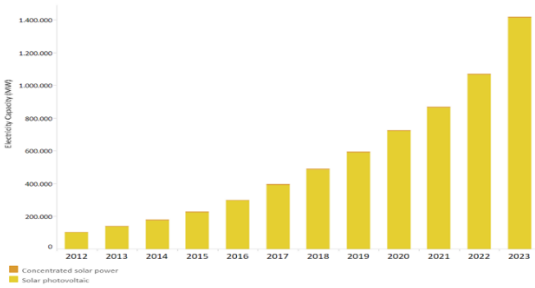
Abstract – *Solar systems are technical systems that utilize solar radiation energy and convert it into a useful form of energy, most commonly electrical or thermal energy. Inadequately designed or improperly executed supporting structures for solar systems are often a primary factor limiting the optimal performance of these systems, leading to various technical and energy inefficiencies. In this work, the K2 Base and ESDEC Calculator software were used as engineering tools for the verification and dimensioning of the supporting structure of a photovoltaic system, with particular focus on the calculation of the stability of ballast-mounted systems on flat roofs.*

Keywords: *Solar systems, supporting structure, K2 Base, ESDEC, statics.*

НАПОМЕНА: Овај рад је проистекао из мастер рада чији ментор је био др Бане Попадић

1. УВОД

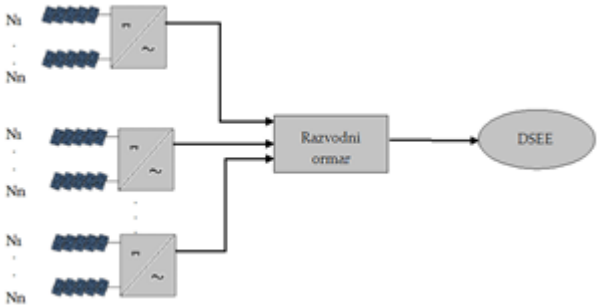
Соларна енергија је једна од најбрже растућих технологија у последње време. Са развојем технологије дошло је и до пада цена опреме за фотонапонске системе, а самим тим интересовање за ову врсту обновљивог извора расте.



Слика 1. График пораста употребе солара као обновљивог извора енергије

Соларна енергија се све више препознаје као један од кључних фактора одрживог развоја и преласка ка нискоугљеничној економији [1] [2].

Основни елементи једног фотонапонског система су: фотонапонски панели, носећа конструкција, инвертор, DC (eng. direct current) разводна опрема, AC (eng. alternating current) разводна опрема, средњенапонско постројење, прикључење на дистрибутивну енергетску мрежу. На слици 2. дат је приказ фотонапонског система:



Слика 2. Блок дијаграм фотонапонског система

2. ПОДЕЛА ФОТОНАПОНСКИХ СИСТЕМА С ОБЗИРОМ НА НОСЕЋУ КОНСТРУКЦИЈУ

Носећа конструкција фотонапонског система представља кључни механички елемент који обезбеђује стабилност, дуготрајност и правилно позиционирање фотонапонских модула у односу на дејство спољашњих утицаја. На слици 3. је приказана подела фотонапонских система у зависности од конструкције:



Слика 3. Блок дијаграм поделе фотонапонских сиистема

У зависности од места уградње и начина ослањања, носеће конструкције фотонапонских система могу се поделити на конструкције за кровне системе и конструкције за тло.

Носећа конструкција фотонапонских система на тлу може бити са фиксним нагибним углом - фиксни системи и промењљивим нагибним углом - ротациони системи. Код фиксне носеће конструкције соларни панели су постављени под унапред дефинисаним углом и оријентацијом, без могућности праћења кретања Сунца током дана или године [3]. Ови системи могу бити:

- Фиксни соларни системи са оптималним положајем (положај се никад не мења)

Фиксни соларни системи са више положаја (периодично, ручно премештање соларни панела)

У зависности од начина кретања, ротациони системи се деле на једноосне и двоосне системе. Једноосни пратећи системи омогућавају ротацију панела око једне осе, најчешће у правцу исток–запад или север–југ, чиме се прати дневно кретање Сунца. Двоосни системи, поред дневног кретања, прате и сезонске промене положаја Сунца.

Кровни фотонапонски системи могу бити:

- Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) - соларни системи интегрисани у објекат
- Roof-mounted (BAPV) - системи постављени на кров

BIPV системи представљају соларне панеле који се директно интегришу у конструкцију зграде, тако да постају део крова, фасаде или других делова објекта.

BAPV системи подразумевају соларне панеле који се постављају на постојећи кров, обично на металну или дрвену носећу конструкцију.

У оквиру кровних система посебно се издвајају конструкције за косе кровове (прате нагиб крова) и конструкције за равне кровове (обично исток-запад орјентација), при чему баластирани системи имају значајну примену код равних кровова. Равни кровови захтевају специфичан приступ пројектовању носећих конструкција услед повећаног утицаја ветра и ограничене носивости кровне плоче. У пракси се примењују два основна концепта: механички фиксирани системи и баластирани системи, при чему баластиране конструкције имају доминантну примену.

Механички фиксирани соларни системи на равним крововима ослањају се на чврсту носећу конструкцију, а причвршћују се помоћу монтажних вијака и стезних елемената директно за носиву подлогу крова.

Баластиране носеће конструкције представљају систем у којем се стабилност фотонапонских модула обезбеђује сопственом тежином конструкције и додатним баластом, најчешће у виду бетонских блокова. Основна карактеристика овог типа система је да се конструкција не причвршћује директно за кровну подлогу, чиме се избегава пробијање хидроизолационог слоја крова. Овај тип карактерише добра стабилност [4].



Слика 4. Носећа конструкција са баластима [4]

3. СОФТВЕРСКА РЕШЕЊА ЗА АНАЛИЗУ НОСЕЋЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

У савременом пројектовању соларних система, софтверска решења за монтажне конструкције имају значајну улогу у обезбеђивању тачног и поузданог прорачуна носеће подструктуре.
Два значајна произвођача монтажних решења на међународном тржишту су K2 Systems и ESDEC, који нуде иновативне системе за фиксирање соларних панела како на косим тако и на равним крововима
K2 Systems и Esdec димензионишу носећи систем соларне електране (баласт, размаке, висине) за задате услове крова. Ово укључује стална оптерећења (сопствена тежина соларних панела, носача и причвршћивача), али и променљива оптерећења узрокована ветром, снегом, температурним променама и земљотресима или механичким утицајима на отвореним инсталацијама [5] [6].

3.1. СОФТВЕР K2 SYSTEMS

Статички прорачун у K2 Systems софтверу заснива се на улазним подацима који се односе на локацију објекта, карактеристике крова и параметре самог система. У прорачуну се узимају у обзир сопствена тежина система, оптерећење ветром и оптерећење снегом. За сваку од зона крова посебно се рачуна узгон ветра, потребна количина баласта да не дође до подизања система, као и провера клизања и превртања. Резултат прорачуна је извештај који садржи податке о потребном баласту и оптерећењу крова. Баласт је приказан по модулу или по редовима и разликује се у зависности од зоне крова. У извештају се даље приказује површинско оптерећење крова изражено у килограмима по квадратном метру. Поред тога, приказује се и максимално површинско оптерећење, које представља највеће локално оптерећење на крову [5].

3.2. СОФТВЕР ESDEC

Статички прорачун у Esdec софтверу заснива се на улазним подацима који се односе на локацију објекта, карактеристике крова и параметре самог фотонапонског система. Esdec пружа и детаљне податке о локалним и тачкастим оптерећењима. Прорачун у Esdec софтверу обухвата сопствену тежину система, дејство ветра и оптерећење снегом. Esdec за сваку од зона крова посебно рачуна узгон ветра, потребан баласт да не дође до подизања система, као и проверу клизања. Разматра се стално оптерећење, променљиво оптерећење од снега, док се ветар посматра као критична провера стабилности система. У извештају се приказују различите врсте површинских оптерећења, укључујући просечно оптерећење преко целе површине крова, просечно оптерећење преко површине на којој је систем постављен и максимално оптерећење на површини испод једног панела. Esdec, за разлику од K2 Systems, рачуна и тачкаста оптерећења. Максимално статичко тачкасто оптерећење (енг. Max static point load) представља највећу силу која делује у једној тачки ослонца система. Поред статичког, приказује се и максимално динамичко тачкасто оптерећење (енг. Max dynamic load). Ово оптерећење односи се на фазу монтаже и одржавања система и укључује ходање монтажера, померање баласта и привремена концентрисана дејства [5].

4. УПОРЕДНА АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА СОФТВЕРА K2 SYSTEMS И ESDEC

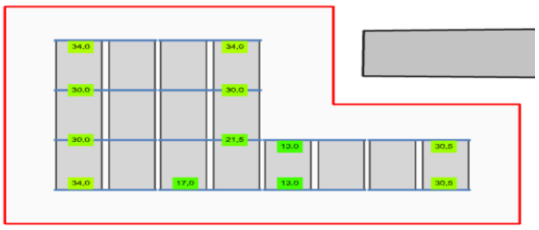
Приликом анализе резултата добијених употребом софтверских алата K2 Base (K2 Systems) и Esdec Calculator уочавају се одређене разлике у количини потребног баласта, расподели оптерећења, као и у примењеним сигурносним маргинама. Софтвери користе Еврокод стандарде. Еврокод (Eurocode) представља јединствени систем европских стандарда који дефинише принципе прорачуна оптерећења и димензионисања носећих елемената грађевинских конструкција.

Посебно важан део за пројектовање кровних фотонапонских система, а нарочито баластираних конструкција, јесте стандард EN 1991-1-4, који се односи на оптерећење ветром. Овај стандард дефинише начин одређивања дејства ветра на кровове, фасаде и друге делове објеката, узимајући у обзир утицај локалних климатских услова и геометрију објекта. Исти нормативни приступ користе и ESDEC и K2, при чему се разлике између ових алата јављају у начину приказа и интерпретације резултата. Кључна разлика између ова два приступа огледа се у моделовању баласта. ESDEC баласт посматра као дискретне, стандардизоване јединице са унапред дефинисаном масом и геометријом. На основу прорачунатих сила, софтвер аутоматски одређује тачан број баластних елемената и њихов распоред по крову, уз посебно наглашавање критичних зона као што су ивице и углови крова, као и положаји у близини стабилизатора конструкције. Са друге стране, K2 баласт третира као укупну потребну масу која је неопходна да би се савладао узгон ветра и задовољили сигурносни захтеви дефинисани Еврокодом. Резултат прорачуна се најчешће приказује као потребна маса баласта по јединици површине, при чему је акценат стављен на најнеповољнију зону крова. Овај приступ даје пројектанту теоријску основу за проверу стабилности, али не врши аутоматску трансформацију у конкретан број и распоред баластних елемената.

K2 Base користи инжењерски оријентисан приступ који је снажно повезан са аналитичким моделима дефинисаним у Еврокод стандардима, пре свега EN 1991 (дејства на конструкције) и EN 1990 (основе пројектовања конструкција). Прорачун се заснива на: подели крова на зоне, аналитичком одређивању притисака и усисних сила ветра, равномерној или зонаски дефинисаној расподели баласта, класичним статичким равнотежним условима.

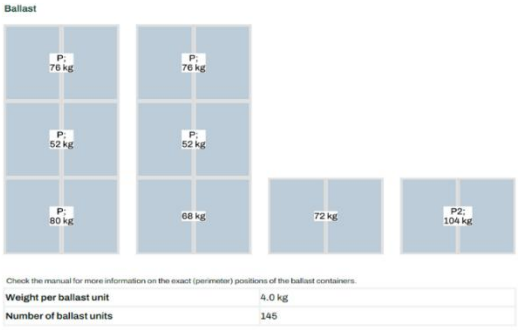
Esdec Calculator користи комбинацију аналитичких прорачуна и експериментално добијених података, пре свега из аеродинамичких испитивања у аеротунелу. Овај софтвер узима у обзир: реалне аеродинамичке коефицијенте добијене испитивањем конкретних система, неравномерну расподелу сила услед турбуленције ветра, интеракцију између редова модула, ефекте локалних појачања усисних сила. Захваљујући оваквом приступу, Esdec Calculator често даје прецизније, али и специфичније резултате који су директно везани за тестирани систем.

На сликама 5. и 6. се виде резултати из софтвера по питању количине баласта. Са слика се види да ESDEC даје доста више баласта од K2 Systems јер посмара систем у реалнијим условима. K2 Systems предвиђа тежину баласта од 13 до 34 kg/m^2, док ESDEC предвиђа тежину баласта од 52 до 104 kg, што је значајна разлика. K2 Systems рачуна тежину баласта по m^2, а ESDEC рачуна тежину по модулу те одређује прецизније колико баласта треба.



Слика 5. Количина баласта из софтвера K2 Systems

Угаоне и ивичне зоне крова изложене су значајно већим усисним силама ветра услед појаве вртлога и локалних аеродинамичких појачања, те захтевају већу количину баласта у односу на унутрашње делове система. Додатни фактор који утиче на расподелу баласта јесте интеракција између редова фотонапонских модула. Предњи редови система често су изложени већим аеродинамичким оптерећењима, док задњи редови могу бити делимично заштићени.



Слика 6. Количина баласта из софтвера ESDEC

Начин расподеле баласта може утицати на гранична стања превртања и клизања. Коефицијент трења између конструкције фотонапонског система и кровне подлоге представља један од кључних параметара у прорачуну отпорности система на клизање. K2 Systems узима коефицијент трења 0,6, док ESDEC узима 0,7.

Аеродинамички коефицијент спољашњег притиска c_{pe} (EN 1991-1-4) је највећа разлика, иако оба софтвера користе Еврокод. Типичне вредности из Еврокода за равне кровове:

- Централна зона крова: $c_{pe} \approx -0,7$
- Ивичне зоне: $c_{pe} \approx -1,2$
- Угаоне зоне: $c_{pe} \approx -1,5$ до $-1,8$

K2 Systems користи ове вредности. ESDEC у критичним зонама користи повећане ефективне коефицијенте, добијене из аеротунелских испитивања (Ивице: ефективно $\approx -1,6$; углови: ефективно $\approx -2,0$ до $-2,4$).Овакав приступ сам по себи може повећати силу узгона ветра 30–60 % у односу на K2.

За коефицијент експозиције ветра $c_e(z)$ K2 Systems узима номиналну вредност за дату висину објекта (нпр. $c_e \approx 1,0–1,2$), док ESDEC често примењује неповољнију вредност за ниске кровове изложене турбуленцији (ефективно $c_e \approx 1,2–1,4$).

Када је реч о сигурносним коефицијентима (γ) K2 узима вредности директно из стандарда за целокупан систем, а ESDEC их у појединим локалним проверама примењује на нивоу појединачног модула / тачке ослонца. Коефицијент унутрашњег притиска c_{pi} K2 Systems често занемарује или узима $c_{pi} = 0$. Међутим, ESDEC у неким конфигурацијама узима $c_{pi} = +0,2$.

Дакле, разлике у количини баласта између K2 Systems и ESDEC проистичу и из различитог приступа моделовању аеродинамичких утицаја ветра, начина провере граничних стања стабилности, као и нивоа детаљности у анализи локалних и тачкастих оптерећења и различитих коефицијената при чему ESDEC примењује реалнији инжењерски приступ.

5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду извршено је детаљно поређење софтверских алата компанија K2 Systems и ESDEC, са посебним освртом на начин на који се спроводи статички прорачун и одређивање баластних оптерећења код равних кровних соларних система.

K2 Base тежи оптимизацији баласта кроз геометрију распореда и конструктивна решења, док Esdec Calculator у већој мери узима у обзир аеродинамичке ефекте као што су подизање и турбуленције између редова, на основу лабораторијски верификованих података. K2 Systems даје у прорачуну 30-40% мање баласта у односу на ESDEC. Резултати потврђују да софтверски алати за пројектовање соларних система морају бити коришћени у складу са системом за који су развијени, уз пуно разумевање њихових прорачунских основа и ограничења, како би се обезбедила конструкцијска безбедност и техничка оправданост пројектованог решења.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Н.-С. Б. Г.-У. Б. Гвозденац Душан, Обновљиви извори енергије, Нови Сад: Факултет Техничких Наука, 2011.

[2] И. К. В. Ф. Владимир Катић, Обновљиви извори електричне енергије, Нови Сад: ФТН, 2007.

[3] К. Д., Обновљиви извори енергије, Београд: Машински факултет, Универзитет у Београду, 2016.

[4] „Принцип рада соларне електране,“ Соларни панели - Србија. [На мрежи]. Available: https://solarnipaneli-srbija.rs/kategorija/solarne-elektrane/princip-rada-solarne-elektrane/. [Последњи приступ 2. 7. 2024.].

[5] E. B.V., „ESDEC Calculator – Упутство за пројектовање баластираних фотонапонских система,“ 2023..

[6] K. S. GmbH, „K2 Base – Упутство за прорачун и пројектовање носећих конструкција,“ 2023.

[7] M. a. з. о. е. (IRENA), „Будућност соларне енергије,“ IRENA, Абу Даби, 2020.

Кратка биографија:

Маријана Цвијић рођена је у Теслићу 1999. године. Дипломирала је на Факултету техничких наука у Новом Саду, на смеру Чисте енергетске технологије, 2024.године. Мастер рад из области Чистих енергетских технологија – „Поређење софтверских решења за анализу носеће конструкције фотонапонских електрана“, одбранила је 2026. године.

Контакт: marijanac84@gmail.com