АЛФА БК УНИВЕРЗИТЕТ
ФАКУЛТЕТ ИНФОРМАЦИОНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

Никола М. Глигоријевић

ХИБРИДНИ МОДЕЛ ЗА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКУ ЕВАЛУАЦИЈУ АЛГОРИТАМА ЗА ДЕТЕКЦИЈУ ИНФРАЦРВЕНИХ СИГНАЛА У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУ

докторска дисертација

Београд, 2025. године

АЛФА БК УНИВЕРЗИТЕТ
ФАКУЛТЕТ ИНФОРМАЦИОНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

ХИБРИДНИ МОДЕЛ ЗА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКУ ЕВАЛУАЦИЈУ АЛГОРИТАМА ЗА ДЕТЕКЦИЈУ ИНФРАЦРВЕНИХ СИГНАЛА У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУ

докторска дисертација

Кандидат:
Никола М. Глигоријевић
2022/5904

Ментор:
проф. др Војкан Николић

Београд, 2025. године

ALFA BK UNIVERSITY
FACULTY OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

A HYBRID MODEL FOR MULTU-CRITERIA EVALUATION OF ALGORITHMS FOR REAL-TIME INFRARED SIGNAL DETECTION

Thesis

Candidate:
Nikola M. Gligorijevic, M.Sc.
2022/5904

Mentor:
Prof. Vojkan Nikolic, PhD

Belgrade, 2025

АЛФА БК УНИВЕРЗИТЕТ
ФАКУЛТЕТ ЗА ИНФОРМАЦИОНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

Датум: _____

Комисија за оцену и јавну одбрану докторске дисертације:

Проф. др Дејан Видука - председник комисије
Редовни професор Факултета информационих технологија, Алфа БК Универзитет, Београд

Проф. др Војкан Николић - ментор
Ванредни професор Криминалистичко полицијског универзитета, Београд

доц. др Јелена Стојановић - члан
Доцент, Факултет за математику и рачунарске науке, Алфа БК Универзитет, Београд

Студент је одбранио докторску дисертацију са оценом: _____(_____)

Академски назив:
Доктор наука – информационе технологије и системи

Образовање је најмоћније оружје које можете употребити да промените свет.

Нелсон Мендела

Education is the most powerful weapon which you can use to change the world.

Nelson Mendela

Иза сваког алгоритма, сваке обрађене секвенце сигнала, иза сваке табеле и сваког модела који чине овај рад, налазе се лица и гласови који су ме подстицали, храбрили и пратили. Иако ова дисертација припада области техничких наука, она није настала у тишини формула, него у животном простору прожетом поверењем, стрпљењем и топлим речима. Оно што је у научном смислу мерљиво, рођено је уз подршку која се не може изразити бројевима. Стога ова захвалност није само формалан исказ, већ покушај да се обухвати све оно што је било неопходно да би овај рад могао да настане.

Пре свега, желео бих да изразим огромну захвалност својој породици, мајци, оцу и брату на несебичној подршци и разумевању. Ваша љубав и вера у мене били су ми увек мотивација и ослонац у животу.

Своју најдубљу захвалност упућујем својој супрузи Мирки, чије је разумевање премашило речи. Њена охрабрења у тренуцима колебања и стрпљење биле су ми највећа потпора у изради ове тезе.

Такође, посебну захвалност дугујем свом ментору, професору Војкану Николићу, чије су стручне смернице, подршка и савети били од непроцењивог значаја за израду дисертације. Његова посвећеност и научни интегритет били су ми од немерљиве важности приликом писања дисертације.

Захваљујем се и професору Дејану Видуци, као и колегама Дејану Анђелковићу, Стефану Поповићу и Данилу Стругаревићу, који су ми били стална подршка и који су такође дали значајан допринос у реализацији мог истраживања.

Свима вама који сте ме пратили, охрабривали и веровали у мене, дугујем искрену и дубоку захвалност. Овај рад настао је и захваљујући вашој подршци, поверењу и присуству које ми је давало снагу онда када је било најпотребније.

Апстракт:

У савременом дигиталном окружењу, у којем преовлађују сложени технички системи и напредни нивои аутоматизације, алгоритми вештачке интелигенције све више добијају на значају у развоју напредних решења за обраду сигнала у реалном времену. Њихова примена у области детекције инфрацрвених (IR) сигнала доприноси унапређење безбедносних, индустријских и научних система, обезбеђујући поуздан рад, високу брзину и способност прилагођавања различитим оперативним условима. С обзиром на разноврсност алгоритама дубоког и машинског учења, јавља се потреба за јасно дефинисаним, проверљивим и методолошки заснованим моделом процене, који омогућава избор најприкладнијих алгоритамских решења у складу са конкретним захтевима примене.

У овом раду реализовано је истраживање за развој и примену хибридног модела за вишекритеријумску евалуацију алгоритама за детекцију инфрацрвених сигнала у реалном времену, заснованог на интеграцији метода SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) и NWA (Net Worth Analysis). Метод SWARA омогућава систематско одређивање тежина релевантних критеријума на основу експертских процена, док NWA пружа оквир за интегралну анализу и финално рангирање алтернатива на бази квантитативних и квалитативних индикатора. Основни критеријуми који су анализирани укључују брзину обраде, тачност детекције, ефикасност сегментације, робусност на шум и енергетску ефикасност. Алгоритми попут Fast R-CNN, YOLO, U-Net, DeepLab, ResNet, FCN, EfficientDet, MobileNet и бинарне сегментације подвргнути су свеобухватној евалуацији у складу са наведеним критеријумима. Резултати истраживања указују да алгоритам Fast R-CNN постиже најбољи укупни скор по интегралној анализи, док други алгоритми показују супериорност у специфичним сегментима, у зависности од приоритета система. Анализом тежина критеријума и добијених резултата обезбеђен је репродуктиван и објективан оквир за доношење одлука, што представља значајан допринос области вишекритеријумског одлучивања у ИКТ-у, али и практичној имплементацији алгоритама у реалним индустријским, безбедносним и истраживачким окружењима.

Ово истраживање унапређује постојећу теоријску и методолошку основу вишекритеријумске анализе кроз примену иновативног хибридног модела који спаја стручну процену са квантитативним показатељима. Такав приступ омогућава јаснији преглед вредности различитих алгоритама и њихову сврсисходну примену у сложеним техничким системима. Поред тога, резултати истраживања доприносе већој дигиталној укључености и широј доступности савремених информационих технологија, чиме се подржава шире распрострањена примена софтверских решења у различитим привредним и друштвеним областима.

Кључне речи:

вишекритеријумска анализа, SWARA метода, NWA метода, вештачка интелигенција, дубоко учење, инфрацрвени сигнали, реално време, евалуација алгоритама, машинско учење, интелигентни системи.

Научно поље дисертације:

Техничко-технолошко научно поље

Научна област:

Информационо комуникационе технологије

Abstract:

In the contemporary digital environment, dominated by complex technical systems and increasing automation, artificial intelligence algorithms have become a key element in the development of advanced solutions for real-time signal processing. Their application in the domain of infrared (IR) signal detection enables the improvement of security, industrial, and scientific systems by providing reliability, speed, and adaptability under various operational conditions. However, due to the diversity of existing deep learning and machine learning algorithms, there is a pronounced need for a methodologically grounded, transparent, and reproducible evaluation model that will allow for the reliable selection of optimal algorithmic solutions in accordance with the specific requirements of each application.

This dissertation investigates the development and implementation of a hybrid model for multi-criteria evaluation of algorithms for real-time infrared signal detection, based on the integration of the SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) and NWA (Net Worth Analysis) methods. The SWARA method enables the systematic determination of the weights of relevant criteria based on expert assessments, while the NWA provides a framework for integral analysis and final ranking of alternatives using quantitative and qualitative indicators. The key criteria analyzed include processing speed, detection accuracy, segmentation efficiency, noise robustness, and energy efficiency. Algorithms such as Fast R-CNN, YOLO, U-Net, DeepLab, ResNet, FCN, EfficientDet, MobileNet, and binary segmentation have been comprehensively evaluated according to the aforementioned criteria. The research results indicate that Fast R-CNN achieves the best overall score according to the integral analysis, while other algorithms demonstrate superiority in specific segments, depending on system priorities. By analyzing the criteria weights and the obtained results, a reproducible and objective framework for decision-making has been provided, representing a significant contribution to the field of multi-criteria decision-making in ICT, as well as to the practical implementation of algorithms in real industrial, security, and research environments.

This work advances the existing theoretical and methodological foundation of multi-criteria analysis by applying an innovative hybrid model that integrates expert knowledge and quantitative assessment, thus enabling a transparent, flexible, and applicable selection of algorithms for complex technical systems. Furthermore, the research encourages digital inclusion and the accessibility of modern ICT technologies in the broader community by democratizing the methodology for the selection of software solutions across various sectors.

Keywords:

multi-criteria analysis, SWARA method, NWA method, artificial intelligence, deep learning, infrared signals, real-time, algorithm evaluation, machine learning, intelligent systems.

Dissertation scientific field:

Technical and Technological Sciences

Scientific field:

Information Technology and Computing

Садржај:

1. Увод 1
1.1. Предмет истраживања 2
1.2. Циљеви и задаци истраживања 3
1.2.1. Циљеви истраживања 4
1.2.2. Задаци истраживања 6
1.3. Хипотезе 8
1.4. Научни, друштвени и практични значај истраживања 10
1.4.1. Научни значај 10
1.4.2. Друштвени значај 11
1.4.3. Практични значај 12
1.5. Метод истраживања и приступ 12
1.6. Структура дисертације 13
2. Теоријски оквири и преглед литературе 15
2.1. Основни појмови у обради инфрацрвених сигнала 16
2.2.1. Бинарна сегментација (Binary Segmentation) 17
2.2.2. U-Net 18
2.2.3. YOLO (You Only Look Once) 19
2.2.4. FCN (Fully Convolutional Networks) 20
2.2.5. ResNet (Residual Networks) 21
2.2.6. EfficientDet 21
2.2.7. DeepLab 22
2.2.8. Fast R-CNN 23
2.2.9. MobileNet 24
2.3. Вишекритеријумско одлучивање у техничким системима 24
2.4. SWARA метода 26
2.5. NWA метода 28
2.6. Анализа постојећих студија које повезују AI алгоритме и MCDM методе 32

3. Методологија истраживања 37
3.1. Општи методолошки оквир - хибридни SWARA–NWA модел 38
3.2. Прикупљање релевантних података о алгоритмима из литературе 38
3.3. Идентификација и формализација критеријума 40
3.4. Структурирање експертских процена и примена SWARA методе 41
3.4.1. Структура улазних података и експертска основа модела SWARA–NWA 42
3.5. Вредновање алтернатива и финално рангирање путем NWA 43
3.6. Нормализација података и избор метрика 44
3.7. Анализа стабилности модела и усклађености резултата 46
4. Резултати истраживања 48
4.1. Приказ алгоритама према критеријуму - Брзина обраде 48
4.2. Приказ алгоритама према критеријуму - Прецизност детекције 50
4.3. Приказ алгоритама према критеријуму - Ефикасност сегментације 52
4.4. Приказ алгоритама према критеријуму - Отпорност на шум 55
4.5. Приказ алгоритама према критеријуму - Енергетска ефикасност 57
4.6. Финални резултати - Интегрална анализа SWARA и NWA метода 60
4.7. Интерпретација резултата 63
4.8. Анализа осетљивости модела 65
5. Дискусија 67
5.1. Процена усклађености између теоријских очекивања и добијених резултата 67
5.1 Тумачење добијених одступања и њихових узрока 69
5.2 Анализа предности и ограничења примењеног модела 70
5.3 Потенцијал модела за примену у другим технолошким доменима 72
5.4 Критички осврт на примењивост резултата у пракси 73
5.5 Предлози за будућа истраживања 75
6. Закључак 77
7. Литература 81
8. Прилози 87
8.1. Списак графика 87

8.2. Списак табела 88
8.3. Списак слика 88
8.4. Биографија аутора 89
8.5. Библиографија аутора 90
8.6. Изјава о ауторству 91
8.7. Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада 92
8.8. Изјаву о коришћењу 93

1. Увод

Дигитална револуција и свеопшта умреженост обележили су почетак 21. века, радикално мењајући начин на који људи данас живе, раде и стварају. Број уређаја повезаних на интернет премашио је двадесет милијарди, а очекује се да ће ускоро достићи нове размере [1]. Такви трендови доводе до успостављања глобалне инфраструктуре у којој подаци постају основни ресурс, а напредни алгоритми и вештачка интелигенција покретачка снага новог технолошког развоја. У том смислу, инфрацрвени (IR) сигнали и системи за њихову детекцију добијају све више на важности [2], пре свега у индустрији, јавној безбедности, здравству, развоју интелигентне инфраструктуре и примени у оквиру одрживих технолошких решења [3-5]. Способност анализе сигнала у реалном времену, уз висок степен поузданости и ниску потрошњу енергије, представља озбиљан изазов за научнике и инжењере широм света [6,7].

У средишту ових изазова налази се питање избора адекватног алгоритма за сложене и захтевне задатке. Развој техника дубоког и машинског учења довео је до настанка низа напредних архитектура: од модела бинарне сегментације, преко Fast R-CNN, YOLO, U-Net, DeepLab, ResNet, FCN, до EfficientDet и MobileNet. Сваки од ових алгоритама доноси своје јединствене предности али и ограничења, неки омогућавају бржу обраду, неки дају прецизније резултате, поједини су отпорнији на шум, док други захтевају мање енергетских ресурса [8-16]. С обзиром на различите захтеве конкретне примене, поставља се питање како донети најбољу одлуку у избору самог решења када је на располагању толико различитих опција, а сваку примену прате специфични захтеви као и ограничења.

Традиционални приступи засновани на појединачним метрикама или емпиријском тестирању често нису довољни за доношење исправних одлука. У реалном свету, у коме се технички и економски захтеви стално мењају, неопходно је приступити избору алгоритма кроз вишекритеријумску анализу, која узима у обзир све аспекте перформанси. Управо ту ступају на сцену методе попут SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) и NWA (Net Worth Analysis), које омогућавају да се у процес одлучивања укључе и квалитативни и квантитативни критеријуми [17]. Захваљујући овим приступима, могуће је рангирати алгоритаме према усклађености са реалним потребама и очекивањима корисника, а не само са апстрактним, лабораторијским условима.

Ова дисертација усмерена је на развој и примену хибридног модела који обједињује SWARA и NWA методологије за процену и избор алгоритама дубоког учења у обради инфрацрвених сигнала у реалном времену. Овакав модел није само теоријски допринос, већ представља одговор на конкретне потребе у технолошкој пракси, где се захтевају висока поузданост, енергетска ефикасност и способност система да се прилагоде различитим условима рада. Процена критеријума као што су брзина, тачност, ефикасност сегментације, отпорност на шум и потрошња енергије спроведена је на основу експертских оцена и конкретних емпиријских података, што овом моделу обезбеђује научну утемељеност и практичну

употребљивост [18-22].

Практична имплементација модела остварена је у сарадњи са стручњацима из различитих области, од рачунарске визије и индустријске аутоматизације, до енергетике и безбедности, као и ослањање на најсавременије изворе података, *benchmark* резултате и анализу постојеће литературе. На тај начин, обезбеђена је валидација резултата у различитим условима примене. Развијени модел омогућава доношење брзих и поузданих одлука чак и у окружењима са ограниченим ресурсима, што је посебно значајно за институције и предузећа у мањим економијама или у областима са израженим техничким ограничењима.

Поред непосредног научног доприноса у области формализације вишекритеријумске анализе у информационо-комуникационим технологијама (ИКТ), овај рад има и снажну друштвену компоненту. Демократизацијом и поједностављењем процеса избора алгоритама, створени су услови за пренос проверених пракси и у оне организације које располажу ограниченим техничким и финансијским могућностима. Развијени модел омогућава не само техничку оптимизацију, већ и већу транспарентност и укљученост корисника у процесе одлучивања, што води ка одрживијем развоју и ефикаснијем коришћењу ресурса.

Рад је истовремено и позив на даље истраживање и интеграција више стручних и научних дисциплина, попут машинског учења, индустријске аутоматизације, енергетике и екологије. Показује да је за савремене технолошке изазове неопходан интердисциплинарни приступ [23]. Резултати истраживања пружају поуздану основу за будуће студије, развој нових алата и унапређење постојећих система, као и смернице инжењерима и доносиоцима одлука који стреме унапређењу професионалне праксе применом проверених међународних искустава.

Коначно, ова дисертација доприноси широј научној и стручној заједници указујући на могућност да пажљиво осмишљен и усмерен ка кориснику, научни модел донесе стварна побољшања у технолошким системима. Спој теоријске иновације и практичне примењивости, уз поштовање етичких, друштвених и еколошких стандарда, поставља темељ за паметније, ефикасније и одрживије друштво. У том смислу, интеграција вишекритеријумских метода и вештачке интелигенције у процесе избора и оптимизације алгоритама представља не само технолошки напредак, већ и корак ка друштву у коме је технологија у служби човека и заједнице [24].

1.1. Предмет истраживања

Предмет овог истраживања је развој и примена хибридног модела за вишекритеријумску евалуацију алгоритама дубоког учења у задацима детекције инфрацрвених сигнала у реалном времену. Посебна пажња посвећена је интеграцији метода SWARA и NWA, с циљем да се омогући систематично, прегледно и објективно рангирање различитих алгоритамских решења у складу са

више независних критеријума: брзина обраде, тачност детекције, ефикасност сегментације, робусност на шум и енергетска ефикасност.

Истраживање обухвата дефинисање и формализацију релевантних критеријума евалуације, прикупљање и обраду емпиријских података и експертских оцена, примену методологије SWARA за одређивање тежина критеријума, као и имплементацију приступа NWA за интегралну анализу и финално рангирање алтернативних алгоритама (попут Fast R-CNN, YOLO, U-Net, DeepLab, ResNet, FCN, EfficientDet, MobileNet и бинарне сегментације). Посебна пажња посвећена је објективности и репродуктивности процеса одлучивања, као и могућностима практичне примене предложеног модела у различитим индустријским, безбедносним и истраживачким окружењима.

1.2. Циљеви и задаци истраживања

Истраживање реализовано у оквиру ове докторске дисертације усмерено је на развој иновативног, хибридног модела за вишекритеријумску евалуацију и избор алгоритама дубоког учења за детекцију инфрацрвених сигнала у реалном времену. Узимајући у обзир комплексност савремених техничких система и захтеве различитих индустријских, безбедносних и научних апликација, истраживање поставља више јасно дефинисаних задатака који треба да допринесу научном сагледавању, технолошком развоју и практичној примењивости модела.

Полазна основа овог истраживања полази од уверење да класични приступи евалуацији и избору алгоритама нису довољни у условима вишекритеријумских захтева и сталних промена у окружењу у коме се технички системи примењују. С тим у вези, истраживање тежи да кроз повезивање савремених метода вишекритеријумске анализе (SWARA и NWA), интензивну сарадњу са експертима и примену реалних података из праксе, креира модел који ће омогућити транспарентно, објективно и поуздано доношење одлука приликом избора најприкладнијег алгоритма. Општи циљ истраживања јесте унапређење процеса селекције и примене алгоритама дубоког учења за анализу инфрацрвених сигнала у реалном времену, уз максималну прилагодљивост, поузданост и економичност. Поред тога, постављени су бројни специфични задаци који подржавају реализацију овог циља, од теоријске анализе и формализације критеријума, преко дизајна и имплементације модела, до валидације резултата у конкретним апликационим сценаријима. Овај приступ омогућава да се кроз истраживање обухвате све релевантне фазе развоја савременог вишекритеријумског система, а резултати служе као поуздана основа за даља истраживања и примену у ширем научном и стручном контексту.

1.2.1. Циљеви истраживања

Циљеви овог истраживања произилазе из савремених захтева који се постављају пред техничке системе, а посебно у домену анализе и детекције инфрацрвених сигнала уз примену напредних алгоритама дубоког учења. Основна тежња рада јесте развој научно и методолошки утемељеног модела који ће омогућити поуздану, објективну и транспарентну процену и избор најадекватнијих алгоритама за конкретне примене у реалном времену, узимајући у обзир све комплексности, ограничења и специфичности индустријског, безбедносног или научног окружења.

Полазећи од чињенице да савремени ИКТ системи функционишу у динамичном и често непредвидивом окружењу, као и да су захтеви у погледу брзине, тачности, скалабилности, енергетске ефикасности и робусности све израженији, постављени су циљеви који превазилазе уско техничко посматрање и обухватају шири спектар аспеката: од математичког моделовања, преко евалуације и селекције, до практичне интеграције и друштвене примене. Истраживање настоји да успостави интегрисани оквир који ће омогућити истовремено задовољење више критеријума, чиме се излази у сусрет стварним потребама корисника, инжењера, менаџера и доносилаца одлука у различитим техничким и друштвеним системима. Један од основних циљева овог истраживања јесте креирање и имплементација хибридног модела који интегрише методологије SWARA и NWA у процесу процене и избора алгоритама дубоког учења за анализу инфрацрвених сигнала. Овај модел је осмишљен с намером да премости јаз између теоријских и практичних приступа, обезбеђујући структуирано прикупљање и анализу експертских процена, као и објективну квантитативну анализу перформанси алгоритама. С тим у вези, један од важних аспеката циљева истраживања јесте дефинисање репрезентативних критеријума који се користе у процесу евалуације: брзина обраде, тачност детекције, ефикасност сегментације, робусност на шум, енергетска ефикасност, сложеност имплементације, као и скалабилност и прилагодљивост алгоритама различитим оперативним условима. Овако широк спектар критеријума омогућава дубље разумевање како појединачни алгоритми одговарају стварним захтевима апликација, али и подстиче холистички приступ у одлучивању.

Истраживање такође настоји да успостави методолошки поуздану процедуру, чији резултати ће бити проверљиви, примењиви у различитим контекстима и лако репродуктивни. Такав приступ подразумева примену систематичног поступка у прикупљању и анализи стручних мишљења, развој софтверског прототипа предложеног модела, као и његову експерименталну проверу на стварним или симулираним подацима. Значајан акценат стављен је на транспарентност поступка и могућност поновљивости резултата, чиме се моделира алат који може бити дугорочно коришћен у процесима доношења одлука у различитим технолошким системима.

У складу са мултидисциплинарним карактером истраживања, посебна пажња посвећена је флексибилности модела, како би га било могуће користити у

различитим контекстима: од индустријских постројења и система аутоматизације, преко безбедносних апликација и мониторинга, до академских истраживања и развоја нових технологија у области рачунарске визије. Један од циљева је и да се кроз развијени модел омогући бржа и ефикаснија интеграција напредних алгоритама дубоког учења у постојеће техничке системе, уз минималне додатне трошкове и захтеве за ресурсима. На тај начин доприноси се технолошком напретку који истовремено води рачуна о економској оправданости и одрживости увођења вештачке интелигенције у свакодневну примену. Циљ ове дисертације је и да се унапреди квалитет доношења одлука у организацијама различитих профила од малих и средњих предузећа до великих индустријских система посебно оних који немају довољно ресурса или експертизе да самостално анализирају сложене техничке проблеме. Кроз интуитивност и транспарентност предложеног модела, омогућено је да широка заједница стручњака и инжењера добије поуздан алат за процену и избор најбољих софтверских решења. Додатно, поставља се као циљ и промоција примене вишекритеријумских модела у ИКТ домену и подстицање дигиталне инклузије, односно омогућавање приступа напредним технологијама и организацијама са ограниченим средствима.

Додатно, истраживање има за циљ да истовремено обезбеди научни допринос кроз проширење постојеће теоријске основе у области вишекритеријумске анализе и практичну вредност путем стварања примењљивог и лако адаптибилног модела за различите апликације. Кроз разраду свих аспеката, од формализације критеријума, преко дефинисања процедура и израде софтверског алата, до валидације и интерпретације резултата тежи се да модел буде поуздана основа за даља истраживања, као и за унапређење процеса одлучивања у области примене вештачке интелигенције у реалном времену. Веома је важно да модел не остане само теоријска конструкција, већ да његова примена буде оправдана у реалним индустријским, безбедносним и истраживачким сценаријима, што доприноси укупном развоју и дигиталној трансформацији друштва.

Још један важан циљ јесте да кроз примену развијеног модела дође до унапређења ефикасности, смањења оперативних трошкова и смањења негативног утицаја на животну средину, што је у складу са глобалним тенденцијама одрживог развоја и друштвене одговорности. Модел треба да омогући доношење одлука које нису само технички оптималне, већ и друштвено одговорне, етичке и усклађене са стратешким циљевима одрживог развоја у енергетици, индустрији и јавном сектору.

Напослетку кроз дефинисање, разраду и експерименталну проверу свих наведених аспеката, циљ је да се постави темељ за будући развој сличних система у другим областима примене вештачке интелигенције, те да се отвори простор за нова истраживања, иновације и унапређење знања на пресеку вишекритеријумске анализе, машинског учења и индустријске аутоматизације.

1.2.2. Задаци истраживања

Задаци овог истраживања осмишљени су тако да кроз природан, али прецизан ток покрију све кључне кораке који воде ка стварању иновативног модела за евалуацију и избор алгоритама дубоког учења у области детекције инфрацрвених сигнала. Циљ је да читалац разуме и комплексност проблема, али и сврху и логичку везу између различитих фаза истраживања.

У самом уводу, истраживање је усмерено на упознавање са најважнијим научним достигнућима и актуелним трендовима у области дубоког учења и вишекритеријумских метода, али и конкретних проблема у обради инфрацрвених сигнала. Овај сегмент истраживања обухвата систематичну анализу релевантних научних и стручних извора, са циљем да се сагледају досадашња достигнућа у области дубоког учења и вишекритеријумских метода, као и конкретни изазови у обради инфрацрвених сигнала. Посматрањем различитих приступа, теоријских модела и практичних решења, успоставља се основа за разумевање динамике развоја ове области. При томе се посебна пажња посвећује идентификовању нерешених питања, недостатака у досадашњој примени постојећих метода, као и препознавању стварних потреба и захтева које намеће савремена технолошка пракса. Такав приступ омогућава да истраживање буде засновано на стварном увиду у развој дисциплине, уместо да се ослања искључиво на апстрактне или изоловане теоријске поставке.

Следећа фаза истраживања обухвата формулисање критеријума на основу којих ће се вршити евалуација алгоритама дубоког учења. Овај задатак подразумева пажљиву равнотежу између техничких параметара, као што су брзина обраде, прецизност и отпорност на шум, и захтева крајњих корисника, који се често налазе у специфичним радним условима и делују у складу са различитим приоритетима. У том поступку учествују стручњаци из релевантних области, анализирају се постојећа решења и дефинишу се параметри који омогућавају да предложени критеријуми буду истовремено математички формулисани и практично употребљиви.

По утврђивању критеријума приступа се избору алгоритама који ће бити предмет анализе. Одабир се заснива на њиховој заступљености у научној и стручној литератури, као и на резултатима постигнутим у сродним областима примене. Сваки алгоритам представља се кроз своје технолошке карактеристике и функционалну вредност у конкретним сценаријима, при чему се настоји да се њихова примена сагледа у контексту стварних потреба [25].

У средишту истраживања налази се пројектовање и имплементација хибридног модела који интегрише методологије SWARA и NWA [26]. Циљ није само математичка повезаност ових приступа, већ развој система који је јасно структуиран, лак за коришћење и прилагодљив различитим окружењима. Софтверска реализација модела, његово тестирање и прилагођавање на основу повратних информација представљају кључне активности у оквиру ове фазе истраживања.

Важан аспект рада односи се на обраду података. Овај део обухвата

прикупљање стварних вредности са инфрацрвених сензора, сарадњу са инжењерима и практичарима, као и припрему и нормализацију података за примену у моделу. Поступак је осмишљен тако да модел одражава услове реалног рада и да резултати евалуације имају директну примену у пракси. Из тог разлога, експериментална валидација модела представља битан корак у потврђивању његове функционалности у различитим индустријским и истраживачким окружењима [27]. Сарадња са крајњим корисницима и анализа њихових искустава омогућавају фино подешавање модела и његово додатно прилагођавање специфичним захтевима различитих система [25, 28].

Истраживање такође обрађује питања од друштвене, етичке и еколошке важности која прате примену вештачке интелигенције у процесима доношења одлука [29]. Анализирају се потенцијални ризици и предности таквих система, уз разматрање механизама којима се може обезбедити њихова одговорна, правично усмерена и друштвено прихватљива примена. На тај начин, истраживање превазилази уско техничке оквире и уноси допринос ширем сагледавању односа између технологије, људских вредности и друштвене одговорности у савременом дигиталном добу.

Слика бр: 1 Дијаграм задатка истраживања

Значајан задатак у завршној фази истраживања јесте дисеминација резултата кроз научне радове, учешће на конференцијама, организацију радионица и спровођење едукативних активности. На тај начин омогућава се да достигнућа модела буду доступна широј академској и стручној заједници, чиме се подстиче њихова даља примена, усавршавање или адаптација у другим истраживачким и технолошким контекстима. Истовремено се отвара простор за нове облике сарадње и за настанак пројеката који ће се градити на основама постављеним овим радом.

Цео ток истраживања организован је тако да одражава динамику савремене научне и технолошке праксе, водећи рачуна о повезаности методолошке прецизности са захтевима који проистичу из реалних потреба корисника и система у којима се решења примењују. На тај начин успостављена је структура која подржава и научну валидност и практичну релевантност, омогућавајући да резултати овог рада допринесу развоју дисциплине и унапређењу технолошког окружења у целини.

1.3. Хипотезе

Савремени токови у развоју информационих и индустријских технологија наметнули су потребу за применом напредних вишекритеријумских метода у евалуацији и избору алгоритама дубоког учења за анализу инфрацрвених сигнала у реалном времену [30]. Све већа комплексност техничких система, разноврсност захтева крајњих корисника и динамичан развој ИКТ сектора указују на значај креирања интегрисаних модела који обезбеђују поузданост, транспарентност и адаптабилност у различитим оперативним условима.

Истраживање представљено у овој докторској дисертацији усмерено је на развој хибридног модела за вишекритеријумску евалуацију алгоритама дубоког учења у обради инфрацрвених сигнала. Предложени приступ повезује савремене концепте вишекритеријумског одлучивања са напредним архитектурама дубоког учења, чиме се унапређује аналитички и примењени домен електротехнике и рачунарства. Модел омогућава систематично и прегледно вредновање перформанси алгоритама у светлу више критеријума истовремено, што до сада није било методолошки обликовано и имплементирано у овом обиму, ни у домаћим ни у међународним истраживањима. Поред доприноса у ширењу теоријског и методолошког оквира у области обраде слике и сигнала, предложени модел представља значајан корак унапређењу поступака селекције и примене алгоритама у сложеним техничким системима. Истраживање одговара на савремене захтеве дигитализације, аутоматизације и развоја интелигентних технолошких решења, са нагласком на објективност, поузданост и ефикасност њихове примене. Приступ који је овде развијен пружа основу за практичну интеграцију алгоритама дубоког учења у реална технолошка окружења, доприносећи безбедности, стабилности и укупном квалитету техничких система нове генерације.

Полазећи од овако постављених циљева, као и на основу свеобухватне анализе постојећих истраживачких приступа и релевантне научне литературе, формулисане су следеће истраживачке хипотезе:

X1: Примена хибридног вишекритеријумског модела, заснованог на интеграцији SWARA и NWA метода, омогућава поуздано, објективно и репродуктивно рангирање алгоритама дубоког учења у задацима анализе

инфрацрвених сигнала у реалном времену, при чему се значајно смањује субјективност и могућност грешке у доношењу одлука.

X2: Дефинисањем релевантних критеријума и њиховом коректном тежинском евалуацијом, могуће је постићи усклађеност између техничких захтева, оперативних ограничења и практичних потреба корисника у различитим индустријским, безбедносним и научним сценаријима.

X3: Имплементација развијеног модела у софтверском окружењу и његова примена на реалним подацима резултира бољим избором алгоритама дубоког учења у односу на класичне приступе, што доводи до унапређења брзине, тачности, енергетске ефикасности и робусности система за обраду инфрацрвених сигнала.

X4: Коришћење предложеног модела омогућава лакшу и бржу интеграцију напредних алгоритама у реална индустријска и истраживачка окружења, доприноси смањењу трошкова експериментисања и развоја, као и широј дигиталној инклузији организација са ограниченим техничким и финансијским ресурсима.

X5: Ако се кроз експерименталну и апликативну валидацију добију позитивни резултати, развијени модел има потенцијал да постане стандардна алатка за селекцију алгоритама дубоког учења у различитим областима примене вештачке интелигенције, што ће утицати на даљи развој методологије вишекритеријумског одлучивања у ИКТ сектору.

Слика бр: 2 Приказ хипотеза

1.4. Научни, друштвени и практични значај истраживања

У времену брзог технолошког напретка, значај истраживања која спајају напредне рачунарске методе, инжењерство и еколошку свест не може се проценити [31]. Ово истраживање, које се бави развојем хибридног модела за вишекритеријумску евалуацију алгоритама дубоког учења у детекцији инфрацрвених сигнала, носи са собом слојевите и далекосежне импликације, не само за научну заједницу, већ и за друштво у целини, као и за реалну индустријску праксу. Сам напредак читавог друштва је неопходно испратити кроз унапређење практичних знања примене технологије [32]. Тако је овај модел један од примера практичне примене како у научном тако и у друштвеном смислу.

1.4.1. Научни значај

Истраживање се заснива на унапређењу постојећих знања у области примене вештачке интелигенције, дубоког учења и вишекритеријумских метода у техничким системима. Развијени приступ доприноси унапређењу постојећих метода у анализи, евалуацији и примени алгоритамских решења у условима који су нестабилни, сложени и често технолошки захтевни. Проблем избора алгоритама за инфрацрвену детекцију до сада се најчешће разматрао у оквиру инжењерских параметара, са фокусом на појединачне критеријуме као што су прецизност или

брзина. Међутим, савремене примене захтевају свеобухватније приступе, који обухватају и прилагодљивост, отпорност на спољне утицаје, енергетску ефикасност и једноставност интеграције у постојеће системе.

Повезивање метода као што су SWARA и NWA са архитектурама дубоког учења отвара могућности за системску и објективну процену алгоритама у складу са више критеријума истовремено. Научни значај рада огледа се у томе што развијени модел унапређује методолошки оквир процене алгоритама и пружа проверљиве резултате, што га чини примењивим не само у контексту инфрацрвене детекције, већ и у бројним другим доменима у којима је потребно уравнотежити различите техничке и функционалне захтеве. У свему томе пре свега предњачи мобилно рачунарство које данас представља једну од најзаступљенијих грана технолошког развоја [33].

Истраживање такође доприноси развоју интердисциплинарних веза, јер се у оквиру рада повезују домени рачунарских наука, енергетике, аутоматизације и друштвених аспеката технологије. Таква концепцијска основа омогућава формирање нових истраживачких приступа и тимова, подстичући сарадњу међу различитим научним дисциплинама и стварање решења која одговарају сложеним захтевима савремене науке и привреде.

1.4.2. Друштвени значај

Друштвени значај овог истраживања огледа се у потенцијалу који развијени модел има за унапређење квалитета живота, ефикасније управљање ресурсима и подршку одрживом развоју. Савремени технолошки системи све више морају одговарати на изазове који се односе на заштиту животне средине, повећање безбедности и рационално коришћење енергије [34]. Модел предложен у овом раду показује да је могуће интегрисати напредне алгоритамске методе у системе који се користе у индустрији, енергетици и мониторингу, при чему се постиже боља организација процеса, смањење штетних утицаја на животну средину и већа друштвена корист. Употреба овог модела омогућава већу транспарентност у процесима одлучивања и подстиче ширење дигиталне писмености, критичког мишљења и приступа технологији у ширем друштвеном оквиру. У времену у којем технолошке неједнакости постају све израженије, посебно је важно омогућити примену напредних решења и у срединама које имају скромне ресурсе. На тај начин доприноси се равномернијој дистрибуцији знања, бољем разумевању улоге технологије и смањењу дигиталног јаза у друштву. Истраживање има и потенцијал да ојача институционалне и организационе способности у области примене вештачке интелигенције. Модел који је развијен може бити подршка јавним установама, образовним институцијама и привредним субјектима у процесима планирања, управљања и процене технолошких решења. Посебно у околностима глобалних криза као што су климатске промене и енергетска транзиција, важно је имати моделе који укључују и техничке и друштвене параметре у доношењу одлука. На тај начин се поставља основа за развој одговорнијих, инклузивних и

еколошки одрживих технолошких система који ће допринети дугорочном напретку заједнице.

1.4.3. Практични значај

Практични значај овог истраживања огледа се у могућности директне примене развијеног модела у широком спектру индустријских, енергетских, безбедносних и еколошких система. Модел који је овде предложен није само академска конструкција, већ конкретан алат који може да одговори на бројне изазове са којима се суочавају инжењери, менаџери и истраживачи у свакодневном раду. Зато унапређењем поступка евалуације алгоритама омогућена је бржа и поузданија селекција решења у условима реалног времена, што је посебно значајно у системима који захтевају висок степен прецизности и стабилности, а то је оно што се заправо и тражи у данашње време.

Примена развијеног модела у пракси може довести до значајног смањења трошкова развоја, јер омогућава рационалнију селекцију алтернативних решења и смањење броја неуспелих имплементација. Практични значај огледа се и у једноставности интеграције модела у постојеће техничке системе, без потребе за великим хардверским или софтверским прилагођавањем. Ово чини модел доступним и корисним за организације различите величине и ресурса, укључујући и мала и средња предузећа, институције и јавне службе. Могућност примене у разноврсним окружењима, као и флексибилност при прилагођавању специфичним захтевима, чини овај рад изузетно релевантним за савремене потребе тржишта и техничког развоја. Осим тога, рад нуди алате за дугорочну оптимизацију и унапређење постојећих система, што води ка већој ефикасности, стабилности и одрживости у функционисању, али и ка повећању конкурентности на домаћем и међународном тржишту. У том смислу, овај рад представља директан допринос практичном развоју, унапређењу процеса и стварању нових вредности у различитим привредним и друштвеним секторима. Пракса показује да је примена оваквих модела важан корак ка стварању паметних, адаптивних и одговорних система који ће имати дугорочан утицај на продуктивност, ефикасност и одрживост не само појединачних организација већ и ширег друштва.

1.5. Метод истраживања и приступ

Методолошки оквир овог истраживања заснива се на уверењу да се најпоузданији резултати у електротехници и рачунарству постижу кроз повезивање теоријског знања са практичним искуством [35]. Истраживање је започето анализом научне и стручне литературе из области вештачке интелигенције, дубоког учења и вишекритеријумске анализе. Овај преглед је омогућио не само стицање прегледа над постојећим решењима, већ и идентификовање нерешених питања, као и уочавање доминантних трендова у

научном и технолошком развоју.

Полазећи од утврђених сазнања, осмишљен је оригиналан хибридни модел који није заснован на репликацији познатих приступа, већ на њиховој надградњи и иновативној примени у специфичном домену анализе инфрацрвених сигнала. Практична реализација модела укључивала је рад са сензорском опремом, микроконтролерима, мобилним рачунарима и софтверским решењима. Сваки елемент система прошао је верификацију у лабораторијским и контролисаним условима који су имитирали реалне сценарије примене. Истраживање је било динамично и захтевало је одговор на различите техничке изазове кроз континуирано тестирање, модификовање и прилагођавање система. У том процесу посебан значај имала је примена вишекритеријумских метода, уз активну сарадњу са стручњацима из различитих области. Захваљујући томе, поступак селекције алгоритама унутар модела остао је организован, прегледан и отворен за проверу. Уз пажљиву обраду квантитативних и квалитативних података, и развој сопственог софтверског алата, реализована је потпуна евалуација и валидација предложеног модела у лабораторијским и реалним условима. Током целокупног процеса истраживања, доследно је поштована научна прецизност, логичка доследност и начело репродуктивности, како би резултати били не само поуздани, већ и примењиви у ширем истраживачком и технолошком контексту.

Овако постављен истраживачки приступ представља допринос и теоријском и практичном развоју струке. Он истовремено одражава уверење да се највреднија научна достигнућа рађају у простору између темељне анализе и инжењерске радозналости, која се испољава у реалним технолошким условима.

1.6. Структура дисертације

Структура ове дисертације осмишљена је тако да омогући поступан и логички прегледни прелазак од општих теоријских поставки ка конкретним истраживачким резултатима. Рад је организован у више тематских целина, од којих свака има јасно дефинисану улогу у целокупном приказу истраживачког процеса и остварених доприноса. Уводно поглавље дефинише оквир истраживања, указује на актуелност и релевантност теме, уводи кључне појмове и образлаже мотивацију за избор области којом се дисертација бави. У овом делу износе се предмет и циљеви истраживања, формулишу се хипотезе, описује методолошки приступ и даје преглед значаја рада. Читаоцу се тако пружа преглед логичке структуре дисертације и оквир очекиваних резултата. Наредно поглавље посвећено је теоријском оквиру, у којем се кроз анализу релевантне литературе, стручних радова и важећих стандарда представљају основни појмови и концепти из области дубоког учења, инфрацрвене детекције, вештачких неуронских мрежа и вишекритеријумских метода. Ово поглавље служи као основа за разумевање проблема којим се дисертација бави, а уједно омогућава увид у најзначајније изазове, постојећа решења и отворена питања у досадашњим истраживањима. У следећем делу рада разрађује се предмет истраживања са нагласком на техничке и

практичне изазове примене алгоритама дубоког учења у области инфрацрвене детекције. Детаљно се анализирају критеријуми за избор и процену алгоритама, као и карактеристике радног окружења, функционални захтеви и техничка ограничења која утичу на изградњу модела. Овај део обухвата све важне кораке - од почетног концепта до финалног тестирања у различитим технолошким условима, зато и чини најобимнији сегмент рада. Посебно поглавље посвећено је експерименталној валидацији и анализи добијених резултата. Овде се врши процена успешности, стабилности и примењивости модела, на основу утврђених метрика и прикупљених података. Уз квантитативну анализу, укључене су и квалитативне оцене, као и упоредни преглед са резултатима других приступа из релевантне литературе. Дисертација се закључује синтезом налаза, указивањем на практичне импликације и предлозима за будући развој модела. У завршном делу формулишу се препоруке за могућа унапређења, потенцијалне правце проширења примене и теме које би могле бити предмет даљих истраживања у области дубоког учења и инфрацрвене детекције.

Овако структурисан рад омогућава читаоцу да систематски прати развој истраживачке идеје, разуме методолошке изборе и анализира постигнуте резултате, али и да стекне увид у шире могућности примене предложеног модела у савременим технолошким и друштвеним условима.

2. Теоријски оквири и преглед литературе

Развој савремених технолошких система, нарочито у области обраде инфрацрвених сигнала, интензивно прати напредак у сфери дубоког учења и вештачке интелигенције. Научна и стручна литература сведочи о томе да примене инфрацрвених сигнала више нису ограничене на традиционалне техничке дисциплине, већ све учесталије проналазе место у индустрији, здравству, системима безбедности и енергетским инфраструктурама [36]. У таквом контексту, захтеви који се постављају пред алгоритме дубоког учења постају све сложенији. Поред брзине, прецизности и поузданости, у фокус долазе и критеријуми попут енергетске ефикасности, отпорности на шум и лакоће имплементације у конкретне техничке системе.

Анализом релевантних радова уочава се све израженија потреба да се процена перформанси алгоритама не заснива искључиво на једном критеријуму. Ово нам доказује да смо на правом путу у смислу креирања најбољег модела. Савремени технички системи захтевају комплексне приступе вредновању, јер појединачни параметри често нису довољни да обухвате све оперативне и функционалне захтеве. Примера ради, висока брзина обраде није довољна ако алгоритам не поседује стабилност у условима шумова, а висока тачност може изгубити значај ако је постигнута уз прекомерну потрошњу ресурса [6, 7, 25]. У том смислу, током последње деценије у научним истраживањима све чешће се примењују вишекритеријумски модели евалуације. Посебно су истакнуте методе као што су SWARA и NWA, које омогућавају истовремену обраду квалитативних и квантитативних показатеља. Ове методе уводе структуриран и прилагодљив оквир за процену алгоритама, омогућавајући истраживачима да обухвате све релевантне димензије техничке примене [37]. Њихова вредност огледа се и у све учесталијој примени у конкретним задацима, попут медицинске дијагностике, интелигентног видео-надзора или мониторинга еколошких параметара [7]. Истраживања потврђују да се најпоузданији резултати постижу комбиновањем различитих метода и извора процене, укључујући експертске анализе, емпиријске податке и математичке моделе. Такав интегрисан приступ омогућава свеобухватнију и репрезентативнију процену могућности алгоритама дубоког учења у сложеним технолошким окружењима [38]. Поред тога, он доприноси већој транспарентности у доношењу технолошких одлука, као и убрзаном преносу знања из научних истраживања у конкретну индустријску и друштвену праксу.

Сумирајући све наведено, може се рећи да вишекритеријумски приступ евалуацији алгоритама за обраду инфрацрвених сигнала у реалном времену представља не само научно релевантан, већ и практично неопходан корак за даљи развој ове области. Такав приступ отвара простор за креирање прилагодљивијих, поузданијих и одрживијих решења, која одговарају савременим изазовима и потребама различитих примена.

2.1. Основни појмови у обради инфрацрвених сигнала

Инфрацрвени (IR) сигнали представљају облик електромагнетног зрачења у таласном опсегу од приближно 700 нанометара до 1 милиметра [39], а њихова примена у техничким и индустријским системима последњих година бележи значајан пораст, захваљујући способности да пружају информације о топлотним својствима објеката, мониторингу процеса у условима слабе видљивости, те подрже развој напредних решења у области безбедности и медицинске дијагностике. Обрада инфрацрвених сигнала подразумева низ поступака који почињу прикупљањем сирових података са одговарајућих сензора или камера, након чега следи предобрада у виду филтрирања, уклањања шума и нормализације, са циљем повећања квалитета података и побољшања сигнал-шум односа (SNR), који директно утиче на поузданост и употребљивост резултата [40,41].

У том контексту, посебно место заузимају адаптивне методе филтрирања и технике базиране на алгоритмима дубоког учења, које омогућавају аутоматско уочавање и корекцију аномалија у сигналу. Један од централних појмова је и сегментација инфрацрвених слика, која се односи на процес аутоматског издвајања релевантних регија интереса унутар слике [42], чиме се омогућава даља класификација и анализа објеката на основу температурних разлика или других физичких својстава. Управо у овом домену значајну примену налазе савремене архитектуре конволутивних неуронских мрежа, попут U-Net, DeepLab, YOLO и других, које показују изузетне резултате у издвајању сложених структура и препознавању образаца у инфрацрвеним подацима. Уз то, алгоритми дубоког учења омогућавају да се традиционално ручно дефинисани критеријуми замене аутоматским, адаптивним моделима, чиме се постиже виши степен прецизности и робусности система у различитим оперативним условима. Поред тога, обрада инфрацрвених сигнала све чешће подразумева интеграцију са другим сензорским и информационим изворима [43], што захтева примену мултидисциплинарних метода за управљање великим количинама података, њихову анализу и визуелизацију у реалном времену. Са коначним циљем да се добију поуздани, репродуктивни и примењиви резултати у различитим областима.

2.2. Алгоритми дубоког учења за сегментацију слика - преглед и анализа

Савремени развој дубоког учења донео је револуцију у области рачунарске визије и обраде слике [44], нарочито када је реч о задацима сегментације. Под сегментацијом слике подразумева се процес аутоматског издвајања и класификације различитих регија или објеката унутар дигиталне слике, што представља основу за напредну анализу сцена, препознавање објеката и доношење одлука у реалном времену. За разлику од традиционалних метода које се ослањају на ручно дефинисане алгоритме или статистичке моделе ограничене комплексности, савремени приступи дубоког учења заснивају се на конволутивним неуронским мрежама (CNN) и њиховим дериватима [45], који

омогућавају аутоматско учење сложених репрезентација из података, без потребе за експлицитним програмирањем правила. Ови алгоритми су у стању да препознају суптилне обрасце, просторно-контекстуалне односе и структурне карактеристике у сликама, што их чини посебно погодним за примену у техничким системима за анализу инфрацрвених сигнала, где је прецизна и робусна сегментација од кључног значаја. Уз то, захваљујући великом напретку у дизајну мрежних архитектура, појавиле су се специјализоване структуре попут U-Net, DeepLab, Fully Convolutional Networks (FCN), YOLO, ResNet, EfficientDet, Fast R-CNN и MobileNet, од којих свака доноси одређене предности у погледу тачности, брзине, отпорности на шум и енергетске ефикасности. Детаљна анализа ових модела, њихових математичких основа, архитектонских специфичности и примењивости у реалним сценаријима, представља кључну основу за даљу евалуацију и избор најоптималнијих решења у области инфрацрвене детекције и сегментације слика [5].

2.2.1. Бинарна сегментација (Binary Segmentation)

Бинарна сегментација представља један од најосновнијих и најраширенијих приступа у обради и анализи слика [46], посебно у иницијалним фазама обраде инфрацрвених сигнала. Основна идеја ове методе јесте да се сваки пиксел у слици категорише у једну од две класе, позадина или објекат интереса на основу дефинисаног критеријума, најчешће прага интензитета или температуре.

Математички, поступак бинарне сегментације може се формулисати као класификациона функција над скупом пиксела $P=\{p_1,p_2,...,p_N\}$ где се за сваки пиксел p_i одређује вредност сегментационе маске $M(p_i)$:

$$M(p_i) = \begin{cases} 1, & \text{ако је } I(p_i) \geq \mathrm{T} \\ 0, & \text{ако је } I(p_i) < \mathrm{T} \end{cases}$$

где је $I(p_i)$ интензитет (или температура) пиксела, а T унапред дефинисан праг.

У практичном смислу, бинарна сегментација омогућава брзо и поуздано издвајање области интересовања из инфрацрвених слика [47], што је од посебног значаја за системе који функционишу у реалном времену, где је брзина обраде пресудан параметар. Ипак, главна слабост овог приступа огледа се у његовој осетљивости на шум, промене у осветљењу и варијације термалних карактеристика објеката, што у сложенијим сценама може довести до нетачних резултата. Због своје једноставности и ниске рачунске захтевности, бинарна сегментација се често користи као уводна фаза у сложенијим архитектурама дубоког учења [48], при чему маска добијена у овој фази служи као основа за даљу анализу или као улаз у касније, прецизније моделе. Такође, ова метода налази примену у областима где је потребна брза и енергетски ефикасна детекција, као што су мобилни системи. Додатно, у савременим истраживањима примењују се и адаптивне варијанте

бинарне сегментације, где се праг T не одређује глобално већ на основу локалне статистике слике [49] (нпр. Otsu алгоритам), чиме се постиже боља робусност у хетерогеним сценама. Овакав приступ омогућава прилагођавање методе конкретним условима рада, чиме се унапређује тачност и поузданост сегментације.

2.2.2. U-Net

U-Net архитектура представља један од најзначајнијих модела у области дубоког учења за сегментацију слика, нарочито у доменима где је потребна висока прецизност издвајања објеката у сложеним и нерегуларним сценама [12]. Овај модел је првобитно развијен за биомедицинску сегментацију, али је због своје флексибилности, ефикасности и способности учења на релативно малом броју узорака, нашао широку примену у обради инфрацрвених и других техничких слика. Основна карактеристика U-Net архитектуре јесте њена симетрична структура у облику слова „U”, која се састоји од два основна дела: енкодера (contracting path) и декодера (expanding path). Енкодер има улогу да екстрахује дубоке и абстрактне особине улазне слике кроз низ конволуција и операција сажимања (pooling), док декодер постепено реконструише просторну резолуцију кроз деконволуционе (up-convolution) слојеве и “skip connection” везе које повезују одговарајуће нивое енкодера и декодера.

Математички, енкодер део се састоји од наизменичних конволуционих операција:

$$f_{i+1} = \sigma\,(W_i * f_i + b_i)$$

где је f_i излаз из слоја i , W_i тежинска матрица, b_i бајас, * означава конволуцију, а σ нелинеарна активациона функција (најчешће ReLU). Pooling операције смањују димензију података и омогућавају учење глобалнијих особина.

У декодер фази, примењују се “up-convolution” (transposed convolution) операције, које враћају просторну резолуцију, док се истовремено кроз „skip connection” комбинују са карактеристикама из енкодера, што омогућава моделу да сачува детаљне локалне информације:

$$g_j = \sigma\,(W_j' * [g_{j+1}, f_{i-j}] + b_j')$$

где је $[g_{j+1}, f_{i-j}]$ конкатенација декодерског и одговарајућег енкодерског излаза.

Излазна сегментациона маска модела дефинише се као:

$$M(x,y) = \mathrm{argmax}_c\, P_c\,(x,y)$$

где је $P_c\,(x,y)$ вероватноћа да пиксел (x,y) припада класи c. Захваљујући оваквој архитектури, U-Net модел је способан да изврши веома прецизну сегментацију чак и када је број тренинг примера ограничен, што је посебно важно у инфрацрвеним системима где је прикупљање података често скупо или технички

захтевно. Даље, примена “skip connection” веза значајно унапређује квалитет сегментације у областима са комплексним границама и суптилним разликама у интензитету. U-Net архитектура се, због наведених својстава, све чешће примењује у анализи инфрацрвених сигнала [50] за рану детекцију објеката, медицинску дијагностику, технички надзор и друге области где је потребно издвајање релевантних структура у реалном времену уз минималне грешке.

2.2.3. YOLO (You Only Look Once)

YOLO (скраћено од *You Only Look Once*) представља један од најпознатијих и најзаступљенијих модела дубоког учења за детекцију и сегментацију објеката у реалном времену [51]. Његова примена у анализи инфрацрвених сигнала постаје све учесталија, пре свега због способности да обрађује велике количине података уз минимално кашњење. Основна иновација YOLO приступ огледа се у томе што се целокупна улазна слика анализира у једном пролазу кроз неуронску мрежу [52], што омогућава постизање изузетне брзине, за разлику од класичних метода које се ослањају на сегментацију слике у више појединачних региона интересовања.

Ова архитектура улазну слику дели на мрежу (S×S) ћелија где свака ћелија предвиђа ограничене боксове (bounding boxes) и вероватноће припадности одређеним класама, при чему се за сваки bounding box израчунавају координате центра (x,y), ширина (w), висина (h) и confidence score, односно вероватноћа да се у том региону налази објекат. Математички, овај модел оптимизује објективну функцију која укључује MSE (Mean Squared Error) за регресију bounding box-ова и cross-entropy за класификацију, odnosno укупни губитак може се записати као:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} 1_{ij}^{obj} \left[(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2\right] \\ + \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} 1_{ij}^{obj} \left[(w_i - \hat{w}_i)^2 + \left(h_i - \hat{h}_i\right)^2\right] \\ + \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} 1_{ij}^{obj} \left(C_i - \hat{C}_i\right)^2 + \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} 1_{ij}^{noobj} \left(C_i - \hat{C}_i\right)^2 \\ + \sum_{i=0}^{S^2} 1_i^{obj} \sum_{c \in classes} \left(p_i(c) - \hat{p}_i(c)\right)^2\end{aligned}$$

где 1^{obj}_{ij} означава да ли bounding box садржи објекат, C_i је confidence score, $p_i(c)$ је вероватноћа класе, а λ_{coord} и λ_{noobj} су хиперпараметри који балансирају поједине компоненте губитка. Захваљујући овој јединственој парадигми, YOLO омогућава обједињено учење просторних и класификационих особина објеката, што резултира високом тачношћу и изузетном брзином, па је погодан за примене

у системима који захтевају рад у реалном времену и на уређајима са ограниченим рачунарским ресурсима. У области обраде инфрацрвених сигнала, YOLO се показује као веома успешан у задацима аутоматске детекције, праћења и сегментације топлотних објеката у динамичким и варијабилним условима, доприносећи значајној аутоматизацији и унапређењу техничких система у индустрији, безбедности и мониторингу [7].

2.2.4. FCN (Fully Convolutional Networks)

FCN (Fully Convolutional Networks) представљају пионирску архитектуру у области дубоког учења за сегментацију слика, јер прве уводе концепт потпуно конволутивних неуронских мрежа, прилагођених задацима где је потребно да сваки пиксел слике буде класификован у једну од класа интереса [53]. За разлику од класичних CNN модела који користе густе (fully connected) слојеве за класификацију на нивоу целе слике, FCN елиминише те слојеве и користи само конволутивне, pooling и upsampling (деконволуционе) операције, чиме омогућава очување просторних односа у слици и даје излаз у облику маске истих димензија као улаз. Основни принцип рада FCN модела може се формално описати као функција $F : R^{H\times W\times C} \rightarrow R^{H\times W\times K}$, где је H висина слике, W ширина, C број канала (нпр. 1 за инфрацрвене слике), а K број класа. Улазна слика пролази кроз низ конволуционих и pooling слојева, што резултује сажетом репрезентацијом, а затим се upsampling-ом (нпр. transposed convolution) враћа оригинална просторна резолуција:

$$Y=\mathrm{Upsample}(C(X))$$

где је X улазна слика, C секвенца конволуционих операција, а Upsample функција која реконструише просторну димензију. Излазна вредност за сваки пиксел представља вектор вероватноћа за припадност свакој класи, а сама сегментациона маска добија се применом операције:

$$M(x,y) = \mathrm{argmax}\ P_k(x,y)$$

где је Pk(x,y) вероватноћа да пиксел (x,y) припада класи k. Оваква архитектура омогућава да се глобални контекст слике и фини локални детаљи обрађују интегрално, што доводи до веће тачности сегментације у изазовним условима, као што су инфрацрвене слике са сложеним позадинама или малим термалним контрастом. FCN модели се често користе као основа за даље надградње у напреднијим архитектурама (нпр. U-Net, DeepLab), а због своје ефикасности и могућности брзе обраде, веома су примењиви у реалном времену, што је од посебног значаја у техничким и индустријским системима базираним на инфрацрвеним сензорима.

2.2.5. ResNet (Residual Networks)

ResNet (Residual Networks) представља једну од најзначајнијих архитектура у области дубоког учења, посебно када је реч о моделима велике дубине који захтевају стабилно и ефикасно учење [54]. Кључна иновација ResNet архитектуре је увођење резидуалних (остатних) веза које омогућавају да се улаз једног слоја директно пропрати на његов излаз, заобилазећи класичан низ нелинеарних трансформација. Овај приступ успешно решава проблем нестајања или експлодирања градијента у дубоким неуронским мрежама [55] и омогућава тренинг мрежа са стотинама или чак хиљадама слојева. Основна јединица ResNet-а је "residual block", који се формално дефинише као:

$$\gamma = F (x, \{ W_i \}) + x$$

где је x улаз у блок, F представља резидуалну функцију (нпр. низ конволуционих, бајас и активационих слојева), а γ је излаз блока. Кроз ову структуру, мрежа учи корекције (остатке) уместо потпуне трансформације улазних података, што убрзава и стабилизује учење. ResNet архитектуре се веома често користе као окосница за сложене моделе сегментације слика (нпр. као енкодер у U-Net или DeepLab архитектурама), јер омогућавају екстракцију вишеслојних, дубоких особина чак и у веома комплексним и шумовитим подацима какав је инфрацрвени сигнал. У задацима сегментације, ResNet као енкодер омогућава дубоку анализу глобалних и локалних структура, а његова робусност на варијације у сигналу и шуму значајно побољшава прецизност финалне маске. Поред тога, примена batch normalization и различитих варијанти активационих функција (нпр. ReLU) додатно унапређује стабилност и убрзава конвергенцију током тренирања. Захваљујући својој структури, ResNet се успешно примењује у анализи инфрацрвених слика за детекцију [56] и сегментацију објеката у условима слабе осветљености, повећаног шума и комплексних позадина, доприносећи поузданости и ефикасности техничких система који функционишу у реалном времену.

2.2.6. EfficientDet

EfficientDet представља модерну архитектуру дубоког учења за детекцију и сегментацију објеката, дизајнирану са циљем постизања оптималне равнотеже између тачности, брзине и ефикасности коришћења ресурса [57]. Основна иновација EfficientDet модела лежи у примени алгоритма као базе за екстракцију особина и увођењу BiFPN (Bidirectional Feature Pyramid Network) структуре за фузију карактеристика са више просторних резолуција. EfficientNet омогућава скалабилност архитектуре кроз истовремено усклађивање дубине, ширине и резолуције мреже (compound scaling), што се формално дефинише као:

$$d = \alpha^{\phi}, w=\beta^{\phi}, r = \gamma^{\phi}$$

где су d, w, r дубина, ширина и резолуција, док су α, β, γ константе а ϕ параметар скалирања. BiFPN додатно унапређује могућност удруживања особина са различитих нивоа мреже кроз пондерисане, двосмерне везе и итеративну оптимизацију, што омогућава ефикасније спајање глобалног и локалног контекста приликом сегментације. Објективна функција за тренинг овог модела обично обједињује cross-entropy губитак за класификацију и IoU-based губитак за прецизност bounding box-ова, са циљем минимизирања укупне грешке у предвиђању:

$$L = L_{cls} + L_{box}$$

где је L_{cls} класификациони губитак, а L_{box} губитак за локацију и величину bounding box-ова. EfficientDet архитектура је изузетно погодна за примену у системима где су рачунарски ресурси ограничени, као што су мобилне платформе [58], уграђени уређаји или edge computing окружења, што је од посебне важности за обраду инфрацрвених сигнала у реалном времену. Захваљујући својој скалабилности и енергетској ефикасности, EfficientDet омогућава интеграцију напредне сегментације и детекције објеката без компромиса у погледу прецизности, што га чини пожељним решењем у индустријским, безбедносним и IoT апликацијама које раде са инфрацрвеним подацима.

2.2.7. DeepLab

DeepLab представља напредну архитектуру дубоког учења за сегментацију слика, познату по способности да ефикасно детектује и разликује објекте различитих величина и облика у сложеним сценама [59]. Кључна иновација DeepLab модела лежи у примени dilated (atrous) конволуција, које омогућавају повећање receptive field-а без повећања броја параметара и губитка просторне резолуције. Формално, dilated конволуција дефинише се као:

$$y[i] = \sum_{k=1}^{K} x[i + r \cdot k] \cdot w[k]$$

где је x улазни сигнал, w филтер, r фактор дилатације, а K дужина филтера. Овај приступ омогућава мрежи да интегрише информације са већих простора у слици, што је од посебног значаја у инфрацрвеним сценама са сложеним и распрострањеним објектима. DeepLab архитектура такође укључује концепт Spatial Pyramid Pooling (ASPP - trous Spatial Pyramid Pooling), који омогућава паралелну екстракцију особина на више различитих скала, чиме се додатно

повећава способност модела да препознаје објекте различитих величина. Финални сегментациони излаз добија се комбиновањем информација из више dilated конволуционих слојева и upsampling операција, након чега се сваки пиксел класификује применом softmax функције:

$$M(x,y) = arg \max_{k} P_k(x,y)$$

где $P_k(x,y)$ означава вероватноћу да пиксел (x,y) припада класи k. DeepLab се посебно истиче у задацима где је потребно сегментирати објекте са нејасним или фрагментираним границама, као што су инфрацрвене слике у техничким и безбедносним системима, јер омогућава прецизно издвајање структуралних детаља и отпорност на шум и варијације у подацима. Захваљујући томе, DeepLab се често користи као основа за даље унапређење сегментационих модела у сложеним сценаријима реалног света [60].

2.2.8. Fast R-CNN

Fast R-CNN представља један од водећих алгоритама дубоког учења за детекцију и сегментацију објеката, развијен као унапређење класичног R-CNN приступа са циљем знатног убрзања и повећања ефикасности без компромиса по питању тачности [61]. Основна иновација Fast R-CNN модела огледа се у томе што се цела улазна слика једном пропушта кроз конволутивну неуронску мрежу ради екстракције мапе особина (feature map), након чега се регије интересовања (Region of Interest - RoI) пројектују директно на ову мапу и обрађују кроз RoI pooling слој, што омогућава знатно мање рачунарских операција у односу на раније моделе.

Математички, нека је F излаз конволутивне мреже над улазном сликом I, а R_j регија интересовања. RoI pooling врши операцију:

$$P_j = \text{RoI_pooling}\ (F, R_j)$$

где се P_j користи као улаз за низ потпуно повезаних слојева, који за сваки RoI израчунавају вероватноће класа (p), као и параметре bounding box-а ($t^u = t_x^u, t_y^u, t_w^u, t_h^u$).

Губитак модела дефинише се као збир cross-entropy губитка за класификацију и smooth L1 губитка за локализацију:

$$L(p,u,t^u,v) = L_{cls}(p,u) + [\ u \geq 1\ ]\ L_{loc}(t^u,v)$$

где је $L_{cls}(p,u) = -\log p_u$ класифкациони губитак, u права класа, а L_{loc} smooth L1 губитак између предвиђених и стварних bounding box параметара. Fast R-CNN је значајно убрзао процес обуке и тестирања у односу на оригинални R-CNN, смањивши меморијску и процесорску сложеност, што га чини врло примењивим у реалном времену и на платформама са ограниченим ресурсима. У области анализе инфрацрвених сигнала, Fast R-CNN је веома ефикасан у задацима

детекције и сегментације објеката у динамичним сценама, захваљујући својој способности да истовремено оствари високу тачност и брзину, што је посебно важно за индустријске, безбедносне и надзорне системе [62].

2.2.9. MobileNet

MobileNet представља групу конволутивних неуронских мрежа оптимизованих за примену у окружењима са ограниченим рачунарским ресурсима, као што су мобилни уређаји, edge и embedded системи [63]. Кључна иновација ове архитектуре је употреба depthwise separable convolution, којом се класична конволуција разлаже на две операције: depthwise convolution, која филтрира сваки улазни канал посебно, и pointwise convolution (1×1 конволуција), која комбинује резултате улазних канала. Овај приступ значајно смањује број параметара и рачунарску сложеност у поређењу са стандардним CNN архитектурама, што се формално може изразити као:

Захтев за множење класичне конволуције:

$$D_K \times D_K \times M \times N \times D_F \times D_F$$

Захтев за множење depthwise separable конволуције:

$$D_K \times D_K \times M \times D_F \times D_F + M \times N \times D_F \times D_F$$

где је D_K величина филтера, M број улазних канала, N број излазних канала, а D_F просторна димензија фичер мапе. Захваљујући оваквом дизајну, MobileNet омогућава имплементацију дубоких неуронских мрежа на хардверу са ограниченом меморијом и процесорском снагом, без значајнијег губитка у прецизности. У задацима сегментације слика и анализе инфрацрвених сигнала, MobileNet се често користи као лагани енкодер или као основа за напредније сегментационе архитектуре [64], омогућавајући обраду у реалном времену на уређајима као што су паметни телефони, IoT чворишта или индустријски контролери. Висока ефикасност, енергетска економичност и задржана тачност чине овај алгоритам изузетно погодним за масовну примену у савременим системима који интегришу обраду инфрацрвених сигнала у динамичном, ресурсно ограниченом окружењу.

2.3. Вишекритеријумско одлучивање у техничким системима

Развој савремених техничких система у области електротехнике и рачунарства данас захтева доношење одлука које никада нису једноставне нити линеарне. Иза сваког избора стоји читав низ фактора, од техничких, преко економских, до безбедносних и еколошких. Управо зато је вишекритеријумско

одлучивање (MCDM - Multi-Criteria Decision Making) постало неизоставни део модерног инжењерства, јер омогућава да свака одлука буде поткрепљена не само бројкама и математичким моделима, већ и здравим разумом и инжењерском интуицијом [65, 68]. За разлику од времена када су одлуке доношене само на основу једне доминантне метрике, попут цене или поузданости, данас су ситуације много комплексније: у стварним техничким системима, свака иновација, унапређење или увођење нове технологије мора да буде процењено са више аспеката истовремено [67]. MCDM уводи једну важну промену у парадигми инжењерског одлучивања: одлуке се више не доносе у празнини, већ у контексту, при чему се за сваки задатак дефинише скуп критеријума који најверније осликавају стварне захтеве и ограничења. У електротехници и рачунарству, типични критеријуми обухватају поузданост система, енергетску ефикасност, трошкове, брзину рада, способност адаптације на шум, сигурност, као и потенцијал за будући развој [66, 71]. Употреба MCDM-а омогућава да се ови често супротстављени критеријуми не само вреднују, већ и међусобно уравнотежују, чиме се долази до одлука које су много ближе стварним потребама индустрије и корисника [72]. Кључна предност MCDM приступа огледа се у томе што даје структуру процесу одлучивања. Различити критеријуми, који су у прошлости често били занемаривани или маргинализовани, сада добијају своје место у анализи, и то на транспарентан и проверљив начин [65, 69]. На пример, у области избора алгоритама за анализу инфрацрвених сигнала, није довољно разматрати само брзину или тачност. Потребно је истовремено укључити и критеријуме попут отпорности на шум, енергетске ефикасности или скалабилности решења. Управо ту MCDM показује своју праву вредност, јер омогућава формирање сложених, али разумљивих модела који воде до примењивих и поузданих решења [25, 66, 73].

Вишекритеријумско одлучивање почива на читавом низу математичких и алгоритамских метода. Међу најпознатијим су Analytic Hierarchy Process (AHP), TOPSIS, Simple Additive Weighting (SAW), SWARA и Net Value Analysis (NWA) [67, 68, 70]. Свака од ових метода има своје посебности: AHP је одличан када желимо да кроз хијерархијски приступ и парна поређења утврдимо стварне приоритете; TOPSIS омогућава брзо рангирање алтернатива на основу удаљености од идеалног решења; SWARA даје простор експертима да кроз итеративни процес заједнички изграде тежине критеријума, а NWA посебно добро функционише када је неопходна једноставна и брза агрегирана процена више фактора [66, 69]. У пракси, избор методе често зависи од конкретног задатка, доступних ресурса, броја алтернатива и сложености самог система. Оно што посебно издваја савремени приступ MCDM-у јесте могућност интеграције са техникама вештачке интелигенције и дубоког учења. Уместо да се одлуке доносе само на основу унапред дефинисаних правила, све више се користе хибридни модели који комбинују експертско знање, статистичке методе и аутоматизовано учење на великим скуповима података [65, 71]. На тај начин, технички системи постају самоадаптивни, односно способни да у реалном времену мењају своје параметре и приоритете у складу са новим подацима и условима рада. Практичне користи од вишекритеријумског одлучивања најбоље се виде у стварним технолошким

изазовима: било да је реч о оптимизацији рада електроенергетских система, селекцији комуникационих протокола, управљању мрежама сензора у аутоматизацији или избору алгоритама за обраду инфрацрвених сигнала. Сваки од ових задатака захтева способност да се балансирају различити интереси и ограничења, односно, да се пронађе не само „најбоље“ техничко решење, већ оно које је у конкретном контексту највише уравнотежено и одрживо [67, 68, 71]. MCDM приступ омогућава управо то: свака алтернатива се сагледава из више углова, и тек онда се бира она која је најбоље прилагођена стварним, комплексним захтевима савремене технике.

Уз то, треба нагласити да је транспарентност MCDM поступка од суштинске важности за дугорочни успех техничких система. Када је цео процес јасно дефинисан, документован и проверљив, одлуке могу бити лако ревидиране, надограђиване и прилагођаване новим технологијама и променама у индустрији. Ово је нарочито важно у ери убрзаних технолошких промена, када се и сами критеријуми евалуације често мењају. У том смислу, MCDM није само помоћно средство за боље инжењерско одлучивање, већ и темељ стварања одрживих и конкурентних техничких система који ће моћи да се носе са изазовима будућности [68, 69, 71]. Вредност вишекритеријумског одлучивања најбоље се огледа у чињеници да ствара простор за дијалог и сарадњу међу различитим струкама и областима знања. Сваки експерт, било да долази из електротехнике, рачунарства, економије или менаџмента, може дати свој допринос дефинисању критеријума и тежина. На тај начин, одлуке које се доносе нису производ засебног размишљања, већ резултат колективне мудрости и интеграције различитих перспектива [69-71].

На крају, MCDM није само збир математичких модела већ и начин размишљања као и алат за стварање иновативних, одрживих и конкурентних решења у савременом техничком свету. Савремени инжењер је позван да, кроз овакве приступе, негује критичко мишљење, али и отвореност за сарадњу, стално учење и интеграцију нових знања, што је најбољи пут ка успеху у динамичној и изазовној области електротехнике и рачунарства.

2.4. SWARA метода

SWARA метода представља један од најиновативнијих приступа за одређивање релативних тежина критеријума у вишекритеријумском одлучивању [74-78]. Настала је као одговор на потребу за једноставном, али истовремено поузданом методом која експертима омогућава да на структуиран и транспарентан начин изразе сопствено мишљење о значају различитих критеријума у сложеним техничким системима [66]. За разлику од традиционалних метода које често захтевају компликована парна поређења или опсежне рачунске процедуре, SWARA се истиче интуитивним корацима и наглашеном улогом људске експертизе у формирању финалних тежина [65]. Основна принцип SWARA методе подразумева да група експерата прво идентификује све критеријуме који су релевантни за одређени проблем. Затим се критеријуми рангирају од најважнијег

ка најмање важном, што је посебно важно у техничким дисциплинама где редослед може бити кључан за финални исход [66].

Експерт рангира критеријуме по важности. Нека су $C_{(1)} \succ C_{(2)} \succ \cdots \succ C_{(n)}$. За $k \geq 2$ уноси се компаративни коефициент $s_{(k)} \geq 0$. Одавде се рачуна редукциони фактор:

$$q_{(i)} = 1, \qquad q_{(k)} = \frac{1}{1 + s_{(k)}}, k \geq 2$$

И „шира“ тежина:

$$w_{(1)}^{SW} = 1, \quad w_{(k)}^{SW} = q_{(k)} w_{(k-1)}^{SW}$$

Након рангирања, сваки наредни критеријум се пореди са претходним и експерти одређују колико је мање значајан у односу на оног који је одмах изнад њега на листи. Ова процена се изражава као процентуално или релативно смањење значаја. Математички, за сваки критеријум (почев од другог у низу) израчунава се коефицијент смањења значаја s_j, на основу кога се добија $k_j = s_j + 1$. Затим се тежина сваког критеријума рачуна поступно, тако што се за други и сваки наредни примењује: $q_j = q_j - 1 / k_j$, са $q_1 = 1$ за најважнији критеријум. Након тога, све тежине се нормализују:

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{i=1}^{n} q_i}$$

Оваквим поступком се омогућава да се почетно субјективна процена претвори у објективне, квантификоване тежине које одражавају стварни однос између критеријума у датом систему [66]. Велика предност SWARA методе огледа се у томе што омогућава експертима да се динамично укључе у процес и да по потреби коригују своје процене у ходу, чиме се повећава транспарентност, али и прилагодљивост методе сложеним, реалним проблемима. Метода SWARA се у литератури издваја по ефикасности у решавању задатака где је важно брзо добити тежине за велики број критеријума, као и по једноставности примене јер поступак се може реализовати у оквиру стандардних табела, без посебних софтверских алата [65, 66]. У пракси, ова метода је нашла примену у широком спектру техничких система: од одабира оптималних технолошких процеса, преко вредновања алгоритама у обради сигнала и слика, до подршке стратешком инжењерском планирању. Посебно је погодна у мултидисциплинарним тимовима, јер захтева јасну комуникацију и сарадњу стручњака из различитих области, чиме се добија свеобухватнија и објективнија процена значаја свих релевантних критеријума [65].

Модерна литература оцењује SWARA као једну од метода која најбоље балансира између субјективног искуства експерата и потребе за формалном, проверљивом и транспарентном процедуром у техничким наукама [65]. Управо

због тога је често препоручивана за примену у инжењерским и ИКТ системима у којима је неопходна комбинација прецизности, брзине и јасне документације доношења одлука. Употребом SWARA методе, истраживачи и инжењери могу лако и поуздано да интегришу стручна мишљења у процес вишекритеријумског вредновања и да тиме обезбеде да донете одлуке буду засноване на реалним потребама и изазовима савремених техничких система [65, 66].

2.5. NWA метода

NWA представља једну од водећих метода у савременом систему вишекритеријумске анализе и избору оптималних решења у техничким и инжењерским дисциплинама. Њена суштинска вредност огледа се у могућности да различите алтернативе, чије се карактеристике оцењују кроз више разнородних критеријума, буду на објективан, репродуктиван и транспарентан начин сведене на једну интегралну меру која одражава њихову укупну корисност и релевантност у конкретном домену примене [79, 80]. Употреба овог модела је нарочито значајна у областима попут електротехнике, рачунарских наука и вештачке интелигенције, где доминирају комплексне одлуке у којима су појединачне метрике недовољне за коначну селекцију. Због тога је ова метода постала кључна у процени напредних алгоритама за обраду инфрацрвених сигнала у реалном времену, где се одлуке доносе на основу више, често конфликтних, критеријума као што су тачност, брзина, робусност на шум, енергетска ефикасност и практична имплементација. Једна од најважнијих карактеристика методе је способност да се квалитативне и квантитативне вредности различитих алтернатива, добијене на основу објективних показатеља, укључе у унифицирани модел кроз примену дефинисаних тежина критеријума. Те тежине најчешће се утврђују на основу стручне експертизе и савремених техника као што је SWARA метода, што осигурава да релевантност сваког критеријума одражава реалне потребе конкретног инжењерског система. Примена модела подразумева да се за сваку алтернативу - у овом случају различите архитектуре или алгоритми машинског учења - прикупе нормализовани резултати по свим критеријумима [81]. Након тога се за сваку алтернативу израчунава збирна нето вредност као производ добијених тежина и постигнутих вредности појединачно за сваки критеријум. Овако дефинисана укупна метрика служи за рангирање и избор најбоље алтернативе, уз потпуно очување математичке транспарентности, што омогућава верификацију и поновљивост процеса у различитим сценаријима [82]. Пракса је показала да овај метод пружа далеко ширу слику од једноставног поређења појединачних карактеристика. Док класичне метрике могу дати приоритет једном аспекту перформанси, модел омогућава балансирање свих релевантних фактора. На пример, у процени алгоритама за сегментацију и детекцију објеката у инфрацрвеном спектру, није довољно фокусирати се само на прецизност детекције, већ је од изузетног значаја укључити и критеријуме као што су отпорност на спољашње сметње, време обраде, као и потрошњу енергије у ограниченим хардверским окружењима. Овај модел нам

омогућава да се сви ти елементи синтетизују у један објективан индекс, што је од посебног значаја у инжењерским системима који функционишу у реалном времену или у критичним инфраструктурама [83]. Посебна предност у односу на остале методе вишекритеријумске анализе огледа се у његовој једноставности примене, као и у могућности интеграције са другим техникама за одређивање тежина и критеријума. Структура модела подразумева да се све вредности појединачних критеријума могу прилагодити путем нормализације, чиме се превазилази проблем различитих јединица мере и омогућавају директна поређења. Осим тога, модел је изузетно погодан за анализу осетљивости јер истраживач може једноставно модификовати тежине или вредности појединих критеријума и уочити утицај тих промена на финалну ранг-листу, што је од непроцењиве важности у фазама тестирања, оптимизације и коначне имплементације инжењерских решења [84]. Такође важан аспект примене овог модела у докторским истраживањима је и могућност да се кроз овај модел добије дубље разумевање компромиса који стоје између различитих алтернатива. То значи да модел не само што пружа једноставно рангирање већ омогућава и анализу снаге и слабости сваког решења, што води ка прецизнијем дефинисању будућих истраживачких смерница и потенцијалних техничких унапређења. Осим што омогућава флексибилност у избору и дефинисању критеријума, модел је у потпуности усклађена са савременим приступима као што је Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), чиме се њена примена додатно легитимише и у академској заједници и у индустрији [82, 84]. Додатна вредност ове методологије је и у томе што се лако интегрише у шири хибридни оквир за вишекритеријумско одлучивање, као што је у овом раду реализовано кроз повезивање са SWARA методом. Оваква интеграција омогућава да се целокупан поступак од дефинисања критеријума и тежина, преко прикупљања података до финалне евалуације, реализује на транспарентан и систематичан начин, са високим степеном репродуктивности и прилагодљивости специфичностима конкретне примене [83]. Управо ова особина чини NWA методом избора за анализу и селекцију у различитим сценаријима, од развоја алгоритама за интелигентну анализу слика, преко оптимизације процеса у индустрији, до сложених система аутоматизације и управљања у реалном времену.

Коначни циљ ове метеоде у раду је био прилагодити тежине мереним подацима уз ограничења конкавности. Прво се приступило раду преко ентропијске тежине, без референтног ранга, тежине извлачимо из варијабилности: ако критеријум слабо разликује алгоритме (висока ентропија), добија малу тежину; ако добро дискриминише (ниска ентропија), тежина расте. Агрегација преко сценарија фаворизује критеријуме који су стабилно информативни.

$$p_{ijst} = \frac{r_{ijst}}{\sum_j r_{ijst}}$$

$$e_{ijst} = -\frac{1}{ln}\sum_{j=0}^{n} p_{ijst} ln\left(p_{ijst} + \varepsilon\right)$$

$$d_{ist} = 1 - \varepsilon_{ist}$$

$$w_{it}^{ENT} = \frac{\sum_s d_{ist}}{\sum_i \sum_s d_{ist}}$$

Након тога је извршено супервизовано подешавање, када постоји операторска корисност односно ранг, тежине се уче минимизацијом грешке између предвиђене и референтне корисности, уз симплекс-ограничење и на крају, регуларизацију ка SWARA приору (конвексни QP). Ово суперизовано подешавање при референтној корисности односно рангу оператора U_{jst}^{*} је вршено према:

$$\min_{w \in \Delta^n} \sum_s \sum_t \left(U_{j^*(s,t),s,t}^{*} - \sum_i w_i r_{ij^*(s,t),s,t} \right)^2$$

уз $\Delta^n = \{w \geq 0,\ \sum_i w_i = 1\}$ и редовизацију $\|w - \widehat{w}^{SW}\|_2^2$.

Хибридизација са SWARA спаја „експертско“ и „податком вођено“: коначне тежине су конвексна комбинација са параметром α одабраним по стабилности ранга τ. Временска динамика (EMA) уводи глаткоћу: параметар β који балансира брзину адаптације и стабилност. Ова хибридизација SWARA NWA модела се може представити на следећи начин:

$$w_{it} = \alpha \widehat{w}_i^{SW} + (1 - \alpha) w_{it}^{NWA}, \qquad \alpha \in [0,1]$$

где $w^{NWA} = w^{ENT}$ или решење из (B), α се бира тако да максимизује стабилност ранга на валидацији.

Динамика тежине је након тога:

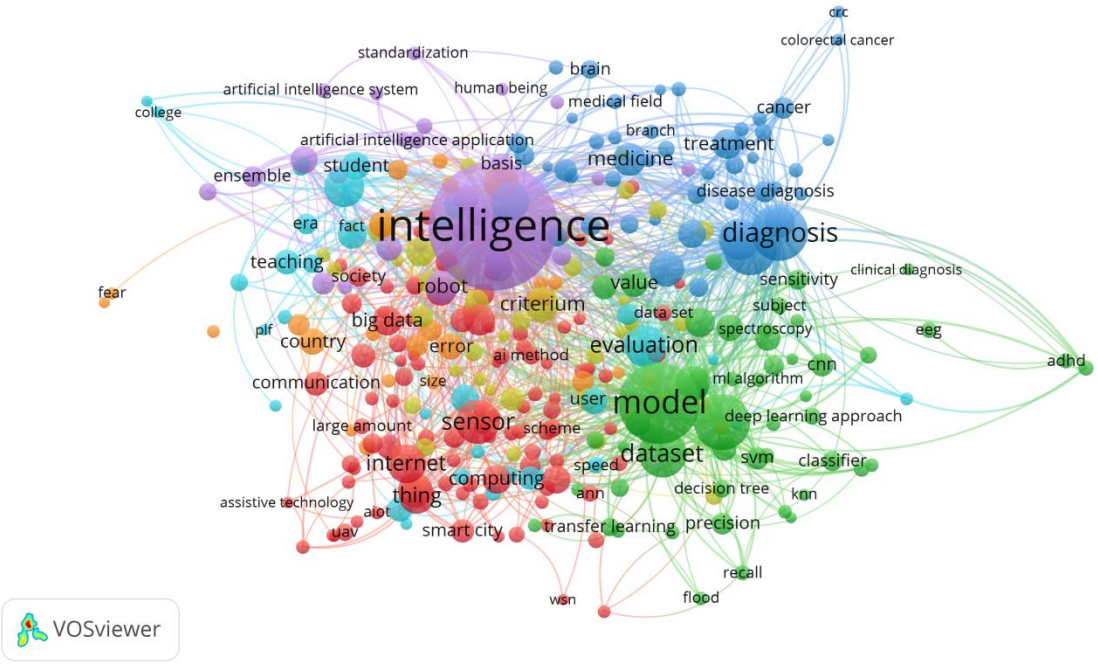
$$w_{it}^{EMA} = \beta w_{i,t-1}^{EMA} + (1 - \beta) w_{it}\,,\ \ \beta[0,1)$$

Све ово у контексту дисертације (IR детекција у реалном времену), ово даје емпиријски оправдане, доменски усидрене и временски стабилне тежине, па је рангирање мање произвољно и боље усклађено са оперативним циљевима. Док се суштина оваквог приступа да тежине критеријума не проистичу само из експертске процене, већ да одражавају информативност коју критеријуми показују на стварним подацима огледа као конкретан допринос. Овим приступом се смањује субјективност, а расте објективност и репродуктивност евалуације, при јасним конвексним ограничењима (не-негативност, збир један).

Сумирајући претходно наведено, овај модел представља методолошки основ за систематично, поуздано и репродуктивно вишекритеријумско

одлучивање у техничким наукама. Његова примењивост, лакоћа интеграције са другим моделима и могућност дубоке анализе компромиса између различитих критеријума, сврставају га међу кључне алате савремене инжењерске анализе, како у академској, тако и у индустријској пракси. Због тога је NWA модел у овом истраживању изабран као основа за финалну евалуацију и избор оптималних алгоритамских решења у области обраде инфрацрвених сигнала у реалном времену.

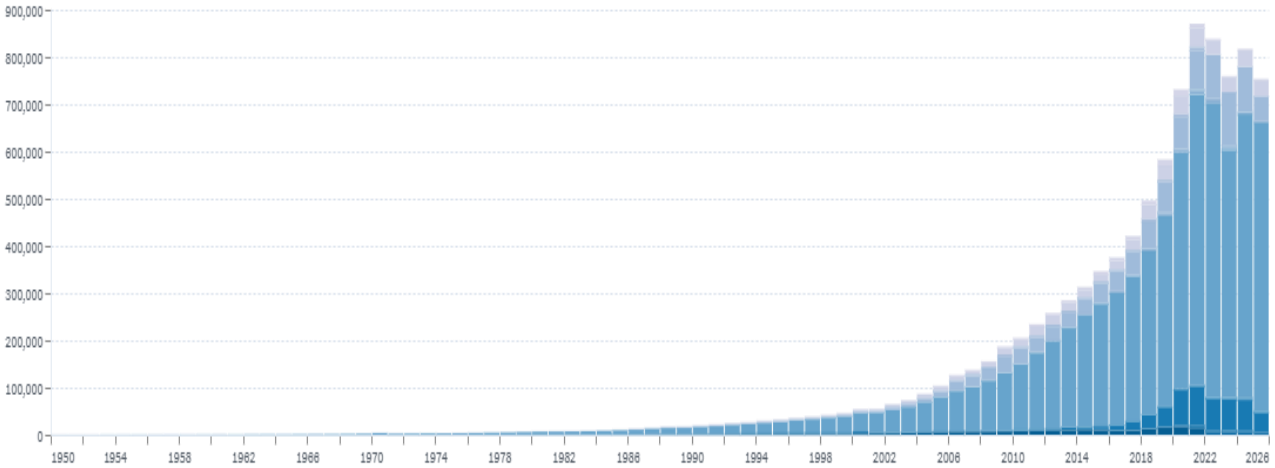
2.6. Анализа постојећих студија које повезују AI алгоритме и MCDM методе



Слика бр: 3 Мрежа ко-јављања кључних речи (VOSviewer); величина чвора ~ учесталости, дебљина везе ~ јачини повезаности (total link strength).

На Слици 3 приказана је мрежа ко-јављања (co-occurrence) кључних речи које структуришу предмет овог истраживања и докторске дисертације. Консолидацијом резултата претрага у водећим библиографским базама прикупљени су оријентирни библиометријски показатељи: најмање једна од кључних речи која чини полазни скуп у овом раду појављује се у 9 837 614 научних радова и 1 208 090 патената, док су радови који садрже макар један од ових појмова укупно цитирани 236 050 235 пута. Ови налази поткрепљују истраживачку релевантност и актуелност теме, указујући на висок интензитет научне продукције у доменима вештачке интелигенције, дубоког учења, интелигентних система, анализе у реалном времену и вишекритеријумских метода. Истовремено, анализе су показале да ниједна идентификована публикација не садржи целокупан скуп кључних речи (artificial intelligence, multi-criteria analysis, deep learning, algorithm evaluation, machine learning, intelligent systems, infrared signals, SWARA method, NWA method) који овде формализујемо, и то не само у листи кључних речи, већ и у насловима, апстрактима, уводима или закључцима. Овај јаз упућује на оригиналност предложене интеграције појмова и методолошких приступа у дисертацији (спој MCDA/MCDM са SWARA и data-driven корекцијама тежина, примењених на евалуацију алгоритама у IR/real-time контексту). Све претраге су

извршене 5. октобра 2025. године у базама: Web of Science, PubMed, Lens, Scopus и Dimensions. Резултати су визуализовани у софтверу VOSviewer (мрежа ко-јављања по терминима).

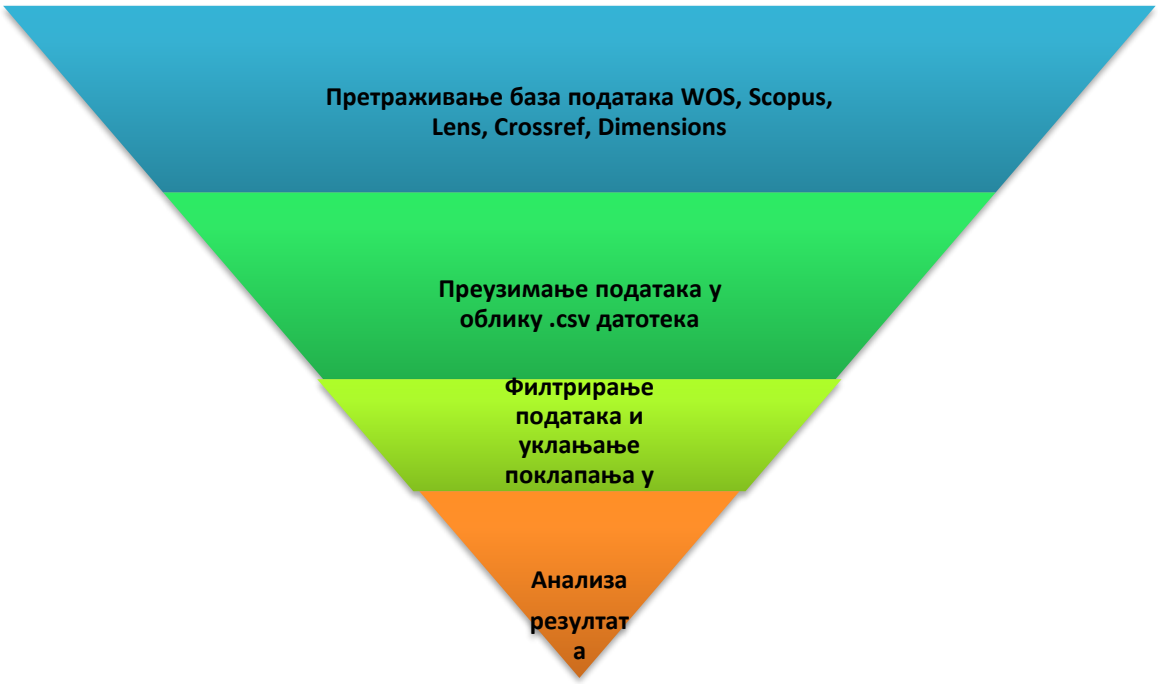


Слика бр: 4 Графички приказ броја радова у којима се појављује макар једна од кључних речи дисертације.

Методолошка поставка овог библиометријског прегледа полази од пажљиво конструисаног скупа појмова који обухвата: multi-criteria analysis/decision making, SWARA method, (NWA/objective/entropy) weighting, artificial intelligence, machine learning, deep learning, intelligent systems, infrared signals, real-time и algorithm evaluation. Скуп је намерно проширен логичким комбинацијама и варијантама термина како би се умањио утицај различитих правописа (UK/US), морфолошких облика (једнина/множина) и синонима, чиме се повећава осетљивост претраге на релевантне изворе. Претраге су спроведене у пољима наслова, апстраката и кључних речи, а где је то подржано, укључена је и категорија keywords plus. Филтери су усаглашени са подразумеваним поставкама сваке базе, при чему је циљ био да се добије индикативан библиометријски пресек домена, а не исцрпан систематични преглед литературе.

Након екстракције резултата, за сваку појединачну базу евидентирани су број радова, цитата и патената у којима се појављује бар један појам из полазног скупа. Добијени корпус је затим визуализован у алату VOSviewer, применом уобичајених поставки за израду тезауруса и распоред чворова по VOS-у, што омогућава прегледност ко-јављања термина и увид у тематске кластере. Истовремено, свесно се полази од ограничења: наведени бројеви представљају кумулацију по базама и, услед различитих политика индексације и степена покривености, могу садржати делимична преклапања. Додатно, полисемија појмова као што су real-time и intelligent systems, као и варијабилност контролисаних речника, може утицати на процену обима резултата. Коначно, налаз да ниједна идентификована публикација не садржи целокупан скуп термина треба тумачити као показатељ интегративне новине предложеног истраживачког оквира, а не као исцрпну негативну потврду за све могуће формулације претрага;

тај јаз управо уоквирује научни допринос дисертације, спајајући методолошке линије које литература досад углавном разматра одвојено. Интеграција алгоритама вештачке интелигенције (AI) са методама вишекритеријумског доношења одлука (MCDM) последњих година представља једно од најдинамичнијих истраживачких подручја у техничко-технолошким и рачунарским наукама. Развој и примена ове синергије омогућава системско, транспарентно и поуздано одлучивање у условима велике сложености, хетерогености података и захтева за оптимизацијом ресурса. Мноштво актуелних студија указује на то да се комбинација AI и MCDM приступа најчешће користи у областима као што су анализа слике, машинско учење, класификација великих скупова података, здравство, саобраћај, енергетика и паметне индустријске апликације. Један од првих и најзначајнијих примера примене интегрисаних модела јесте вишекритеријумска селекција и рангирање дубоких неуронских мрежа за класификацију сложених образаца. Тако, на пример, у истраживању Hou и сарадника (2022), аутора који се баве анализом инфрацрвених слика у реалном времену, примењена је комбинација convolutional neural network (CNN) алгоритама са AHP и VIKOR методама, при чему је оцењивање обављено на основу техничких критеријума као што су брзина обраде, тачност и робусност у условима шума [4]. Истраживање показује да хибридизација AI и MCDM приступа доноси знатно бољу транспарентност и рационалност у избору оптималног модела, као и већу стабилност резултата у динамичким сценаријима.



Слика бр: 5 Приказ методологије библиографског истраживања

Слично томе, у студији коју су спровели Ghorbanzadeh и сарадници (2019) [12] представљена је интегрисана употреба random forest и support vector machine

(SVM) алгоритама са fuzzy AHP и TOPSIS методама у анализи клизишта и земљишта на основу сателитских података. Овде је MCDM оквир омогућио вредновање више геопросторних и техничких критеријума истовремено, док је AI алгоритам коришћен за генерисање и иницијалну селекцију карактеристика, чиме се убрзава процес одлучивања и минимизира утицај субјективности [12]. Аутори су изнели закључак да овакав хибридни модел значајно повећава поузданост и примењивост система за мониторинг и рано упозоравање.

У здравственом сектору, посебно у медицинској дијагностици, комбинација дубоких неуронских мрежа са MCDM моделима постаје стандард за вишекритеријумско вредновање различитих модела аутоматске класификације. Siddique и сарадници (2021) [14] анализирају примену U-Net и других CNN архитектура за медицинску сегментацију, где је финална процена модела остварена кроз интеграцију вишекритеријумских техника као што су SWARA и PROMETHEE. Резултати показују да овакав приступ доводи до коначног избора модела који није само технички најбољи, већ и прилагођен специфичним захтевима клиничке праксе [14].

Паметни саобраћајни системи и урбана аналитика такође су области у којима се активно спајају AI алгоритми са MCDM техникама. Xu и сарадници (2020) [16] развијају интелигентни мониторинг систем који интегрише deep learning са моделом ELECTRE за доношење одлука у реалном времену. Њихови резултати показују да оваква интеграција омогућава боље управљање ресурсима, аутоматизовано препознавање критичних ситуација и повећану безбедност у динамичким урбаним срединама [16]. Искуства из индустрије потврђују да овакви хибридни системи могу донети значајне уштеде и побољшања у управљању комплексним инфраструктурним процесима.

У области енергетике и паметних градова, Lin и сарадници (2020) демонстрирају предности интеграције improved analytic hierarchy process (AHP) са машинским учењем за управљање ризицима од поплава и предикцију ризичних зона. Вишекритеријумска компонента омогућила је да се узму у обзир различити типови података (хидролошки, метеоролошки, геоморфолошки) и да се на основу њих приоритизују интервенције и ресурси у стварном времену, чиме се значајно унапређује одговор система на екстремне догађаје [85].

Истраживања у индустријској примени MCDM и AI модела показују да је ова комбинација од велике важности за унапређење производних процеса, селекцију одрживих технологија и аутоматизацију сложених ланаца снабдевања. Burggräf и сарадници (2020) развијају методологију за процену и вредновање перформанси система заснованих на AI у управљању производњом, уз примену хибридних MCDM алата који омогућавају избор најоптималнијих решења у зависности од техничких и економских критеријума [86]. Такви приступи постају све важнији у контексту Индустрије 4.0, где је потребно ускладити техничке иновације са ресурсним и финансијским ограничењима.

Још једна значајна област у којој се повезују алгоритми вештачке интелигенције и методе вишекритеријумског одлучивања јесте анализа сензорских података и мултисензорска фузија. Dong и сарадници (2009) указују на то да је

управо приступ заснован на више критеријума неопходан за објективну процену и рангирање различитих алгоритама за фузију података, нарочито у условима који захтевају високу прецизност, брзу реакцију и стабилност система у променљивом окружењу [9]. Такав приступ омогућава да се резултати добијени применом модела вештачке интелигенције не тумаче само у лабораторијским условима, већ да буду прилагођени реалним захтевима примене. На тај начин се повећава корисност и поузданост система у практичном окружењу, где је потребно донети одлуке на основу разноврсних и често непотпуних података.

Поред класичних MCDM метода, све више се примењују и њихове варијације засноване на фази логици и сивим системима (fuzzy и grey MCDM), што омогућава ефикасније руковање неизвесношћу, непотпуним информацијама и субјективним проценама. Ulutac и сарадници (2020) представљају модел који комбинује grey PIPRECIA и grey OCRA методе са машинским учењем у задацима селекције кадрова у индустријском сектору, показујући високу адаптивност у окружењима са високим нивоом варијабилности [87].

Из свега наведеног, можемо закључити да анализа релевантне литературе указује на то да синергија AI алгоритама и MCDM метода представља нови квалитативни ниво у процени, селекцији и имплементацији техничких решења у различитим дисциплинама. Ови хибридни модели, који обједињују снагу аутоматизованог учења са аналитичком прецизношћу вишекритеријумске анализе, све више се прихватају као стандард у развоју напредних система за обраду сигнала, управљање ресурсима и подршку одлучивању. Истовремено, омогућавају бољу транспарентност, разумевање компромиса између критеријума и већу прилагодљивост убрзаном технолошком развоју, што их чини изузетно релевантним за будућа истраживања и примене у пракси.

3. Методологија истраживања

Методолошки приступ у овом истраживању заснован је на прецизности инжењерског размишљања, систематичном планирању и научној проверљивости, са циљем да се постигне поуздана и репродуктивна процена ефикасности савремених алгоритама за детекцију инфрацрвених сигнала у условима обраде у реалном времену. Као истраживање које настаје у оквиру докторских студија у области електротехнике и рачунарства, предложени методолошки оквир не представља само теоријску конструкцију, већ резултат дубоког разумевања конкретних техничких изазова у областима рачунарске визије, обраде слике и развоја интелигентних система. Полазећи од сложености проблема и разноликости параметара који утичу на рад алгоритама, изабран је хибридни модел који обједињује методе SWARA и NWA. Ова комбинација није одабрана као резултат шаблонског приступа, већ као плод критичке анализе постојећих метода одлучивања и њихове примене у системима који се одликују динамичним условима и ограниченим ресурсима. Основна замисао овог приступа јесте да се повежу аналитичке технике са стварним подацима и стручним искуством, како би се креирао инструмент који има проверљиву примену у технолошкој пракси. Циљ је да се превазиђу оквири класичне техничке анализе усредсређене искључиво на бројчано поређење перформанси, и да се успостави процена која обухвата шире аспекте као што су примењивост, адаптабилност и стабилност алгоритама у реалним условима. Посебна вредност овог истраживања огледа се у томе што методологија није замишљена као апстрактан модел, већ као функционалан алат који може подржати процес доношења одлука у развоју напредних техничких система, аутономних решења и уграђених уређаја. Истраживање је организовано у низ повезаних корака који почињу систематичном анализом литературе, техничке документације и постојећих извештаја о евалуацији модела, уз разматрање најрепрезентативнијих архитектура дубоког учења. Након дефинисања критеријума вредновања, приступа се прикупљању стручних оцена, које се уз помоћ SWARA методе претварају у нумеричке тежине на јасан и поновљив начин. На основу добијених тежина примењује се NWA метода, која кроз процес нормализације и агрегирања омогућава завршно рангирање алгоритама. Овако структуриран приступ у потпуности одговара научним и технолошким стандардима електротехнике и рачунарских наука, јер омогућава доношење одлука које су засноване на проверљивим подацима, технички оправдане и директно примењиве у пракси. Његова вредност није ограничена на решавање конкретног истраживачког задатка, већ пружа основу за примену у другим областима у којима је потребно комбиновати математичке методе са стручним увиђањем, нарочито када су подаци непотпуни или променљиви.

3.1. Општи методолошки оквир - хибридни SWARA–NWA модел

Ово истраживање заснива се на примени хибридног модела који обједињује две методе: SWARA и NWA, са циљем да се обезбеди поуздано и транспарентно оцењивање алгоритама дубоког учења који се користе за обраду инфрацрвених сигнала у реалном времену. Осмишљен је систем који спаја емпиријске податке, стручне увиде и резултате експеримената у јединствену аналитичку целину, са нагласком на стабилност, прегледност и поновљивост. Први корак у моделу представља примена SWARA методе, која омогућава да стручњаци изразе своје процене о значају појединих критеријума кроз упоређивање, без ослањања на сложене упитнике или строга статистичка правила. На основу њихових оцена израчунавају се тежине које одражавају релативну важност сваког критеријума у формирању коначне оцене алгоритама. Након добијања тежинских вредности, примењује се NWA метода која узима у обзир све критеријуме и њихову важност, дајући сваком алгоритму једну агрегатну вредност која представља сажету процену његових перформанси. Ова вредност омогућава директно поређење различитих модела, чиме се поступак рангирања поједностављује и постаје лакше интерпретабилан. Посебна пажња посвећена је испитивању стабилности модела, односно његовој отпорности на варијације у подацима и параметрима кроз анализу осетљивости. Провера је показала да резултати задржавају поузданост и у случајевима мањих одступања у тежинама или улазним вредностима, што потврђује примењивост модела у динамичним условима. Модел је осмишљен тако да буде лако прилагодљив различитим типовима података и алгоритама, што га чини употребљивим не само у академским истраживањима већ и у конкретним технолошким системима у областима као што су аутоматизација, безбедност, индустрија и развој интелигентних уређаја. У свим овим сценаријима захтеви за брзом, прецизном и поузданом анализом представљају важан услов, нарочито у ситуацијама где су ресурси ограничени, а окружење променљиво.

3.2. Прикупљање релевантних података о алгоритмима из литературе

Процес прикупљања података представљао је један од најважнијих корака у изградњи поуздане аналитичке основе за процену алгоритама. С обзиром на брз технолошки развој и разноврсност модела, основни циљ ове фазе био је прибављање проверених, тачних и савремених података који верно одражавају перформансе различитих алгоритама у стварним и примењивим условима. У том циљу спроведен је детаљан и систематичан преглед релевантне литературе, који је обухватио научне радове, евалуационе студије, извештаје са упоредних тестирања, техничке публикације и поуздане изворе из области рачунарске визије, вештачке интелигенције и обраде сигнала. Овакав приступ омогућио је формирање шире и методолошки засноване базе података која је послужила као основа за каснију анализу. Избор алгоритама за обраду укључивао је неколико

важних критеријума. Најпре је разматрана њихова заступљеност у радовима објављеним у признатим научним часописима и на водећим конференцијама, што указује на њихову препознатљивост у стручној заједници. Потом су узети у обзир резултати постигнути на јавним скуповима података, где су алгоритми тестирани у стандардизованим условима, што је омогућило објективно поређење. Трећи параметар био је везан за проверену примену у стварним системима као што су безбедносне платформе, аутономна возила или медицинске апликације.

Међу анализираним моделима нашли су се Fast R-CNN, различите верзије YOLO алгоритма, DeepLab, U-Net, ResNet, FCN, MobileNet, EfficientDet, као и алгоритми за бинарну сегментацију. Сваки модел је детаљно анализиран на основу више извора, како би се стекло целовито разумевање њихове ефикасности, ограничења и специфичних техничких карактеристика. Прикупљени подаци обухватали су широк опсег метрика. Издвајају се време обраде (односно брзина извршавања), прецизност у детекцији објеката или образаца, ефикасност у сегментацији, отпорност на шум у сложеним условима и потрошња енергије, што је од посебне важности за уграђене и мобилне системе. Поред ових, разматрани су и пратећи технички параметри, као што су захтеви за хардверским ресурсима, могућност примене на различите обиме података, као и способност адаптације на различита окружења, укључујући промене у резолуцији и условима осветљења. Сви подаци прикупљани су из радова објављених у последњих пет година, са акцентом на оне који се баве обрадом инфрацрвених и термалних слика. Овакво временско ограничење омогућило је избегавање застарелих приступа и обезбедило да анализа одражава тренутно стање технолошког развоја. Поред академских публикација, у анализу су укључени и технички извештаји из индустрије, као и подаци из пројеката отвореног кода. Ови извори били су од велике важности, јер нуде увид у понашање алгоритама у стварним оперативним условима, који често нису обухваћени академским студијама. На пример, индустријски извештаји пружили су податке о томе како се алгоритми понашају у окружењима са ограниченим хардверским капацитетима или у динамичним ситуацијама, што је од суштинске важности за разумевање њихове практичне вредности. Подаци су пажљиво организовани у јединствену базу, уз јасну документацију извора, услова под којима су мерења извршена и метода којима је извршена процена. Посебна пажња посвећена је провери поузданости сваког извора. Уколико су различити извори давали различите вредности за исту метрику, примењиван је поступак пондерисаног усредњавања, при чему су већу тежину добијали резултати из радова објављених у високо рангираним публикацијама и на реномираним научним скуповима.

Овако конципиран процес прикупљања података обезбедио је јасну, прегледну и методолошки утемељену основу за наредне фазе истраживања, укључујући нормализацију и примену хибридног модела SWARA–NWA. Строг поступак верификације података, пажљив избор извора и фокус на примењивост резултирали су анализом која је поуздана, транспарентна и примењива. Такав приступ има посебан значај за реалновременске системе, у којима се од алгоритама очекује висока прецизност и брзина, чак и у условима ограничених

ресурса. На крају, ова методолошка стратегија није донела само академску валидност, већ и директну примењивост у различитим технолошким и индустријским доменима, као што су безбедност, аутоматизација и развој паметних система.

3.3. Идентификација и формализација критеријума

Пре него што се приступи процени алгоритама, неопходно је прецизно дефинисати критеријуме који ће представљати основу за њихову анализу [88]. Ови критеријуми нису изабрани произвољно, већ су формирани на основу темељног прегледа литературе, разговора са стручњацима из техничких области и дубљег разумевања захтева система који функционишу у реалном времену и користе инфрацрвене сигнале. Циљ овакве процедуре јесте успостављање јединствене и репродуктивне структуре за упоредну анализу алгоритама, без обзира на њихове архитектонске разлике или специфичности примене [25, 28, 89].

Први корак у том поступку подразумевао је идентификацију параметара који најзначајније утичу на ефикасност и оперативну употребљивост алгоритама. На основу релевантне литературе и инжењерске праксе, издвојени су следећи критеријуми: брзина обраде, прецизност детекције, ефикасност сегментације, отпорност на шум и енергетска ефикасност. Сваки од ових критеријума одговара специфичним захтевима различитих апликација, као што су безбедносни системи, медицинска дијагностика, системи за надзор или аутоматизоване платформе.

Брзина обраде одражава способност алгоритма да у кратком времену анализира улазне податке и донесе одлуку, што је од пресудне важности у реалновременским системима, где и минимално кашњење може довести до озбиљних последица.

Прецизност детекције процењује способност алгоритма да тачно идентификује објекте или обрасце у инфрацрвеном домену, уз минималну појаву лажних позитивних или негативних резултата [90].

Ефикасност сегментације односи се на способност алгоритма да прецизно раздвоји релевантне објекте од позадине, што је нарочито важно у задацима где је просторна структура података од суштинског значаја.

Отпорност на шум представља меру у којој алгоритам задржава стабилне перформансе у присуству различитих сметњи, као што су температурне флуктуације, визуелне интерференције или смањени квалитет слике, што је посебно важно у динамичним и непредвидивим окружењима [25, 91].

Енергетска ефикасност је критичан фактор за мобилне и уграђене системе, као и за уређаје у оквиру интернета ствари, где је неопходно да алгоритам одржи високе перформансе уз минималну потрошњу енергије [6, 92].

Ови критеријуми су прецизно дефинисани, квантитативно изражени где је то могуће и повезани са конкретним метрикама. На пример, брзина обраде се изражава у фрејмовима у секунди (FPS) или у милисекундама по слици; прецизност се мери уз помоћ показатеља као што су Intersection over Union (IoU),

F1-score или accuracy; отпорност на шум анализира се кроз варијације перформанси у условима са различитим нивоима интерференција; енергетска ефикасност се мери потрошњом у џулима или ватима, односно кроз однос између утрошене енергије и постигнутог нивоа перформанси. Овако формулисани критеријуми представљају мерљиве инструменте у оквиру аналитичког модела, омогућавајући доследну примену методе SWARA за одређивање релативне важности и методе NWA за финално рангирање алгоритама. Њихова улога није само у теоријском моделовању, већ и у повезивању научних стандарда са инжењерским потребама реалних система. Стога, резултати добијени на основу ових критеријума имају и научну валидност и оперативну примењивост, нарочито у доменима као што су безбедност, паметни уређаји и системи са ограниченим ресурсима.

3.4. Структурирање експертских процена и примена SWARA методе

Квалитет резултата добијених применом хибридног SWARA–NWA модела у великој мери зависи од начина на који су експертске процене организоване, обрађене и интегрисане у оквир анализе. Основна идеја ове фазе је да се субјективно знање стручњака претвори у квантитативно мерљиве вредности, које ће послужити за израчунавање тежинских коефицијената критеријума.

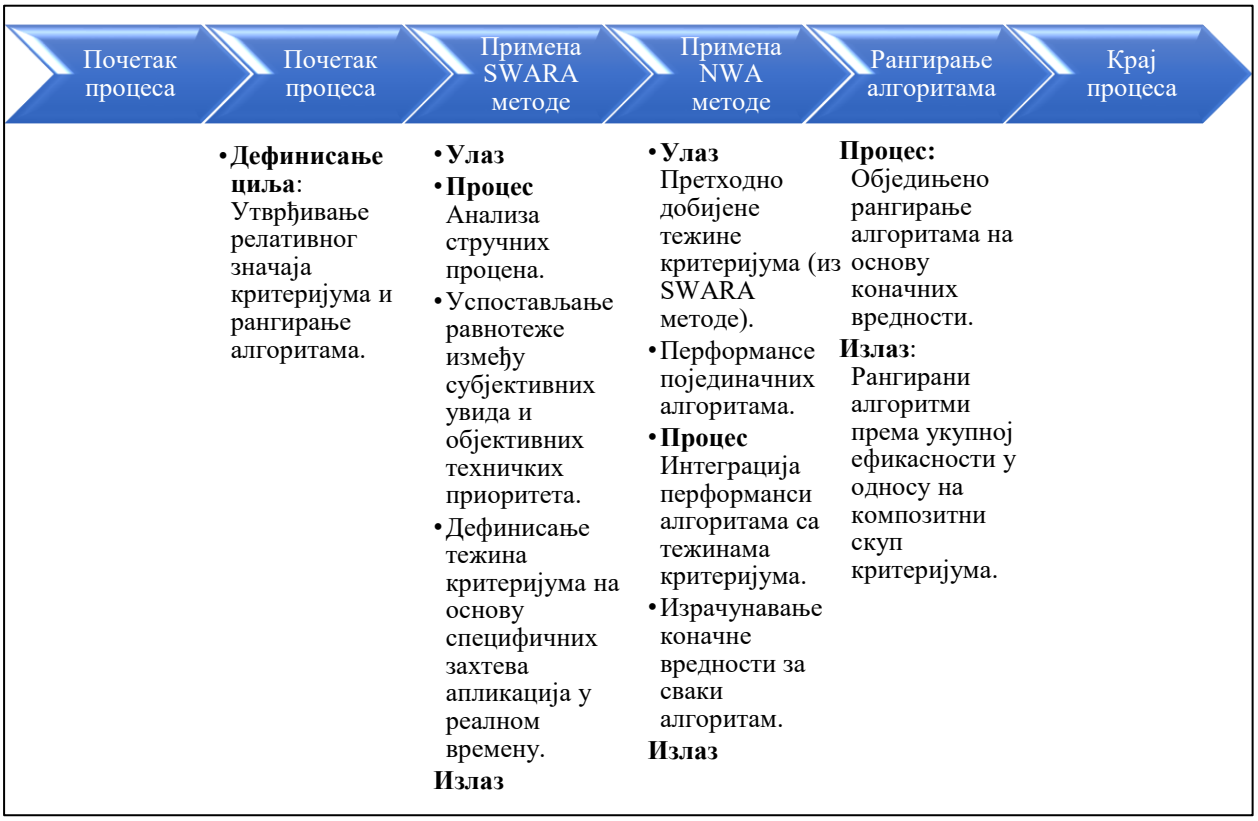
Процес структурирања експертских процена реализован је у складу са принципима методе SWARA која се заснива на логичком и контекстуалном рангирању критеријума по значају [93]. Експерти најпре идентификују листу критеријума који су релевантни за анализу алгоритама, а затим одређују њихов међусобни приоритет, при чему се сваки критеријум процењује у односу на претходни у низу. Овим поступком добијају се релативне вредности значаја које су касније нормализоване и коришћене у NWA фази за израчунавање укупног скор-а сваког алгоритма.

Цео процес је осмишљен тако да обезбеди транспарентност и поновљивост, што значи да свака одлука има јасно образложење и може се верификовати на основу докумената и улазних података. Посебна пажња посвећена је елиминацији могућих пристрасности кроз примену контролисаних процедура у комуникацији са експертима, као и кроз коришћење верификованих методолошких техника заснованих на консензусу.

Сврха овог корака није била само одређивање тежина, већ и постизање вишег степена објективности у оквиру субјективног процеса. На тај начин, експертска процена није посматрана као изолована активност, већ као методолошка компонента унутар система који повезује људско знање и нумеричку анализу.

Резултат овог процеса је био стабилан вектор тежина критеријума, који представља оптималан баланс између експертског искуства и реалних техничких захтева система. Овај вектор је у наредној фази анализе постао улазни параметар у NWA моделу, чиме је остварена потпуна интеграција квалитативних и

квантитативних елемената унутар јединственог аналитичког оквира.



Слика бр: 6 Приказ истраживачког модела

3.4.1. Структура улазних података и експертска основа модела SWARA–NWA

Формирање улазних података за хибридни SWARA–NWA модел представља кључни корак у методолошкој конструкцији истраживања. У овом делу поступка комбинују се експертске процене и емпиријски подаци о перформансама алгоритама како би се обезбедила свеобухватна и уравнотежена основа за даљу анализу.

Улазни подаци потичу из више извора: експерименталних мерења, стандардизованих техничких извештаја и резултата објављених у релевантној научној литератури. Сваки алгоритам укључен у анализу: Fast R-CNN, YOLO, U-Net, DeepLab, ResNet, FCN, EfficientDet и Binary Segmentation — описан је кроз сет показатеља који одговарају пет утврђених критеријума. Да би се осигурала компатибилност података различитих типова и димензија, спроведена је нормализација вредности на интервал [0,1], чиме је сваки параметар доведен у једнак аналитички положај унутар NWA модела.

Паралелно са прикупљањем техничких података, спроведен је поступак експертске евалуације критеријума. За потребе истраживања формиран је панел од осам експерата из области машинског учења, рачунарског вида и система техничке заштите. Избор учесника извршен је према строгим критеријумима: најмање десет

година искуства у релевантној области, учешће у научним пројектима и познавање техника дубоког учења.

Процес евалуације спроведен је применом Delphi методе, у две фазе [94]. У првој рунди сваки експерт је самостално оцењивао значај пет критеријума, док је у другој рунди оцењивање поновљено након увида у колективне резултате, како би се постигла што већа сагласност. На овај начин обезбеђен је висок степен конзистентности и транспарентности експертских процена, што је потврђено коефицијентом сагласности који је премашио 0.85.

Добијене вредности ранга и односа приоритета унете су у SWARA модел, где је извршена математичка трансформација у вектор тежина. Тај вектор је потом послужио као улазни елемент у NWA анализи, где је комбинован са нормализованим подацима о реалним перформансама алгоритама. На овај начин, модел је постао интегрисани систем одлучивања у коме се спајају експертска интуиција и објективни докази.

Овако структурисани улазни подаци имају двоструку улогу: с једне стране обезбеђују нумеричку основу за евалуацију, а с друге стране задржавају контекстуалну интерпретабилност захваљујући експертским увидима. Управо овај баланс између квалитативног и квантитативног чини SWARA–NWA приступ погодним за сложене системе као што су они за детекцију инфрацрвених сигнала у реалном времену.

3.5. Вредновање алтернатива и финално рангирање путем NWA

По завршетку процеса одређивања тежинских коефицијената за сваки критеријум, истраживање је настављено применом методе NWA, као другог дела хибридног модела. Главна сврха NWA методе у овом случају била је да обједини податке о перформансама алгоритама у једну свеобухватну вредност, збирну нето оцену, која служи као основа за коначно рангирање алгоритама. За разлику од других метода вишекритеријумске анализе, које често подразумевају строге границе или апсолутну супериорност једног решења, NWA се ослања на принцип укупне вредности [95]. Овај приступ је посебно користан у ситуацијама где не постоји једно идеално решење, већ низ компромисних опција, што омогућава флексибилнију и реалнију процену. Процес примене NWA методе почео је пажљивим прикупљањем и организовањем података о перформансама алгоритама, на основу информација из литературе, евалуационих платформи и емпиријских мерења. Да би подаци били упоредиви, извршена је нормализација, односно трансформација сирових вредности у јединствене, упоредиве јединице. Овај корак укључивао је линеарну скаларну нормализацију, којом су све вредности преведене у распон од 0 до 1. При томе је посебна пажња посвећена разликовању критеријума са позитивним и негативним утицајем, како би се обезбедила тачност анализе. Након нормализације, за сваки алгоритам је израчуната укупна вредност тако што су нормализовани резултати помножени са тежинским коефицијентима добијеним из SWARA анализе. Ова збирна вредност, или „нето корист“, показује колико је

одређени алгоритам усклађен са постављеним техничким и оперативним захтевима тако да, што је већа вредност, то је алгоритам боље рангиран. На основу ових вредности, алгоритми су коначно поређани, уз додатну проверу да би се утврдило да ли су резултати осетљиви на промене појединачних параметара. Комбинација NWA и SWARA метода омогућила је да се стручне процене преточе у конкретне, мерљиве резултате, спајајући субјективно људско вредновање са аналитичком прецизношћу. Овај приступ не само да је помогао у идентификацији најбољег алгоритма, већ је пружио и дубљи увид у предности и слабости сваког од њих. То је било посебно корисно у ситуацијама где избор алгоритма зависи од специфичних потреба примене, а не само од општег рангирања. Да би се потврдила поузданост резултата, спроведено је тестирање стабилности модела. Варирањем тежина и поновљеним анализама утврђено је да редослед алгоритама остаје доследан чак и при различитим улазним условима. Овај налаз потврђује снагу и прилагодљивост NWA методе у оквиру хибридног система, чинећи је примењивом и у другим истраживањима изван овог конкретног контекста.

Нето вредност сваке алтернативе (у овом случају алгоритма) израчунава се на основу нормализованих резултата и одговарајућих тежинских коефицијената. Формално, за n алтернатива и m критеријума, нето вредност алтернативе A_i дефинише се као:

$$NW(A_i) = \sum_{j=1}^{n} w_j \cdot r_{ij}$$

3.6. Нормализација података и избор метрика

Процес нормализације представља кључан корак за вишекритеријумску анализу [96], посебно када се, као у овом истраживању, упоређују перформансе алгоритама измерене у различитим јединицама, опсезима и контекстима. На слици 5 приказан је поступак трансформације сирових вредности критеријума у нормализовани формат погодан за примену у NWA анализи. Сврха нормализације је да се подаци, који често имају различите скале, трансформишу у јединствен формат, омогућавајући тако уједначено и објективно поређење. Без овог корака, израчунавање коначне вредности у NWA не би имало ни математичку ни логичку основу, јер би директно сабирање или упоређивање неусклађених података довело до нетачних резултата. У овом истраживању изабрана је линеарна скаларна нормализација као једноставна, али ефикасна метода за обраду података различитог типа. За критеријуме где је већа вредност пожељна (нпр. тачност, брзина или енергетска ефикасност), вредности су скалиране тако да најбољи резултат добије оцену 1, док су остали пропорционално распоређени у односу на

њега. За критеријуме где је нижа вредност боља (нпр. латенција или грешка у сегментацији), примењена је обрнута логика, па је најмања вредност добила највећу нормализовану оцену. Овај приступ осигурава да сви подаци, без обзира на природу критеријума, буду у истом распону (од 0 до 1), што омогућава њихово обједињавање у коначну оцену. Избор метрика за оцењивање алгоритама пажљиво је усклађен са стандардима у области обраде инфрацрвених слика, ослањајући се на устаљене праксе из литературе. За мерење тачности коришћене су добро познате метрике као што су Precision, Recall, F1-score и Intersection over Union (IoU) [97], које показују колико је алгоритам успешан у идентификацији објеката и разликовању сигнала од позадине. Брзина обраде мерена је у сликама по секунди (FPS) или просечном латенцијом по кадру (у милисекундама). Енергетска ефикасност процењивана је на основу потрошње енергије по јединици обраде или укупне снаге потребне за рад модела у реалним условима. За тестирање робусности на шум, анализиране су промене у F1-score или IoU вредностима у условима различитих нивоа деградације слике, укључујући термалну интерференцију, насумичне пикселе или варијације осветљења [98]. Ефикасност сегментације оцењивана је помоћу Dice коефицијента и просечне тачности класификације пиксела. Сви ови подаци прикупљени су из емпиријских тестова, *benchmark* испитивања и симулација, а у случајевима са више извора, коришћена је средња пондерисана вредност за већу поузданост. Овај приступ обезбедио је да процес оцењивања буде методолошки утемељен, али и заснован на мерљивим и разумљивим показатељима. Нормализација је омогућила да подаци различитих скала постану део истог аналитичког оквира, док је пажљив избор метрика гарантовао да се сви важни аспекти перформанси од тачности до енергетске ефикасности узму у обзир на свеобухватан и практичан начин.

Нормализација резултата зависи од типа критеријума. За критеријуме које треба максимизирати:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

За критеријуме које треба минимизирати:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

Након израчунавања NW(Ai) за све алтернативе, алгоритми се рангирају у опадајућем редоследу. Алтернатива са највишом нето вредношћу сматра се најуспешнијом у складу са изабраним критеријумима и њиховим релативним значајем.

Унификација преко b_i:

$$R_{st} = \frac{1}{2}\left[\left(I + Diag(b)\right)D_{st}\left(\bar{x}_{st} - x_{st}^{min}1_m^T\right) + (I - Diag(b))D_{st}(x_{st}^{max}1_{st}^T - x_{st})\right],$$

Где је $R_{st} \in R^{nxm}$ матрица нормализованих оцена за сценарио s и време t.

Слика бр: 7 Процес нормализације података у оквиру хибридног SWARA–NWA

3.7. Анализа стабилности модела и усклађености резултата

У циљу потврде да предложени хибридни модел SWARA–NWA није само валидан, већ и поуздан у различитим условима примене, спроведена је детаљна анализа стабилности добијених резултата. Посебна пажња посвећена је испитивању осетљивости модела на промене у тежинама критеријума, варијацијама у перформансама алгоритама, као и на разлике у стручним проценама. Основно питање које је водило ову анализу било је да ли на коначно рангирање алгоритама утичу појединачни улазни параметри или модел поседује довољан степен отпорности да задржи конзистентност чак и у случају мањих одступања.

Симулације различитих сценарија омогућиле су систематско тестирање стабилности модела. У првој фази, намерно су модификоване вредности тежинских коефицијената добијених методом SWARA, при чему су поједини

критеријуми добијали увећану или умањену релативну важност, а у појединим случајевима привремено су изостављани из анализе. Истовремено, вршена је и контрола перформанси алгоритама, тако што су одређене вредности улазних података намерно померане навише или наниже, како би се испитала осетљивост рангирања на промене које симулирају реалне варијације у условима рада.

Резултати добијени у овим експериментима указали су на висок степен стабилности модела. Упркос променама у улазним параметрима, редослед алгоритама на ранг-листи остајао је у великој мери непромењен. Забележена су само минимална померања, и то углавном код алгоритама чије су перформансе и иначе биле сличне. Ова стабилност показује да модел није преосетљив на индивидуалне субјективне процене стручњака или на умерене флуктуације у подацима, што значајно доприноси његовој поузданости у стварним системима.

У следећој фази, добијено рангирање упоређено је са подацима из релевантне литературе, укључујући резултате *benchmark* тестова и постојећих емпиријских студија. Констатовано је да се алгоритми који су у овом моделу заузимали водеће позиције готово у потпуности поклапају са онима који се у академској и стручној заједници сматрају најпогоднијим за примену у реалном времену. Ова усклађеност са спољашњим изворима додатно потврђује и валидност и релевантност модела.

На овај начин заокружен је методолошки оквир истраживања. Анализа стабилности није само потврдила интерну конзистентност система, већ је пружила основ за поверење у резултате и њихову примењивост. Овако конципиран модел, који комбинује структурирану експертску процену са математички заснованом вишекритеријумском анализом, показује висок потенцијал за употребу у интелигентној обради инфрацрвених сигнала у условима где су прецизност, брзина и поузданост од пресудне важности.

4. Резултати истраживања

Ово поглавље обележава завршну фазу истраживачког оквира и усмерено је на излагање резултата добијених применом претходно описане методологије. Полазећи од тежинских коефицијената израчунатих методом SWARA, а затим спроводећи интегралну анализу помоћу NWA приступа, у овом делу рада представљена је коначна процена ефикасности и рангирање разматраних алгоритама за обраду инфрацрвених сигнала у реалном времену. Истраживање је усмерено на изградњу свеобухватног оквира који обједињује више критеријума процене и омогућава примену у различитим техничким сценаријима.

Резултати који су овде изложени одражавају вредносни положај сваког алгоритма у оквиру дефинисаног система процене. Ова процена обухвата не само објективне перформансе, већ и шире димензије примењивости, поузданости и енергетске одрживости. Такав приступ омогућава увид у технолошке карактеристике система у складу са актуелним захтевима индустрије и истраживања.

Посебна пажња посвећена је тумачењу резултата и њиховој повезаности са налазима из релевантне литературе. Подаци добијени овом анализом упоређени су са доступним емпиријским студијама и benchmark извештајима, чиме је омогућена јасна процена доследности и актуелности истраживачког оквира. На тај начин, ово поглавље представља логичну целину истраживачког процеса, при чему су резултати организовани тако да подрже формулисање закључака и развој препорука за будући рад у области интелигентне обраде инфрацрвених сигнала у реалном времену.

У складу са поступком описаним у поглављу 3.4.1, улазни подаци добијени су комбиновањем експертских оцена и нормализованих техничких вредности, чиме је обезбеђена свеобухватна основа за примену SWARA–NWA модела.

4.1. Приказ алгоритама према критеријуму - Брзина обраде

Резултати приказани у графику 1 указују да алгоритми *Binary Segmentation*, *Fast R-CNN* и *U-Net* постижу највише вредности у погледу брзине обраде, са укупним тежинама од 0,245 и 0,213. Њихов приступ обради података одликује се високим степеном оптимизације, што их чини погодним за примене у системима којима је битан ре, као и у технолошким окружењима која захтевају рационално коришћење хардверских ресурса. Погодност ових алгоритама огледа се у способности да обезбеде поуздану и брзу анализу података у апликацијама као што су аутономне платформе или уређаји са ниским енергетским капацитетом. Алгоритми *YOLO* и *MobileNet*, са вредношћу од 0,193, постижу уравнотежен однос између брзине и квалитета резултата. Такав профил их чини примењивим у ситуацијама које захтевају брзу детекцију, попут видео надзора или интелигентних уређаја. Алгоритми *FCN*, *ResNet* и *EfficientDet*, са тежинама у опсегу од 0,160 до

0,178, остварују мањи степен ефикасности у погледу брзине. Њихове особине ипак пружају предности у задацима који укључују сложенију обраду података и већу техничку прецизност, као што су анализе слика високе резолуције или дубоки модели учења. Ова процена пружа основу за избор алгоритма у складу са захтевима конкретног система. Брзина обраде представља важан критеријум у техничким дисциплинама као што су електротехника и рачунарство, где се тежи прецизном и поузданом функционисању система у реалном времену.

Табела бр. 1: Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Брзина обраде

(Извор: Истраживање аутора.)

Algoritam	**Subjektivna težina (Sj)**	**Koeficijent (Kj = Sj+1)**	**Preračunata težina (Wj)**	**Konačna težina (qj)**
MobileNet	0.10	1.10	0.791	0.193
Fast R-CNN	0.20	1.20	1.000	0.245
DeepLab	0.15	1.15	0.870	0.213
EfficientDet	0.12	1.12	0.654	0.160
ResNet	0.12	1.12	0.654	0.160
FCN	0.08	1.08	0.732	0.178
YOLO	0.10	1.10	0.791	0.193
U-Net	0.15	1.15	0.870	0.213
Binary Segmentation	0.20	1.20	1.000	0.245

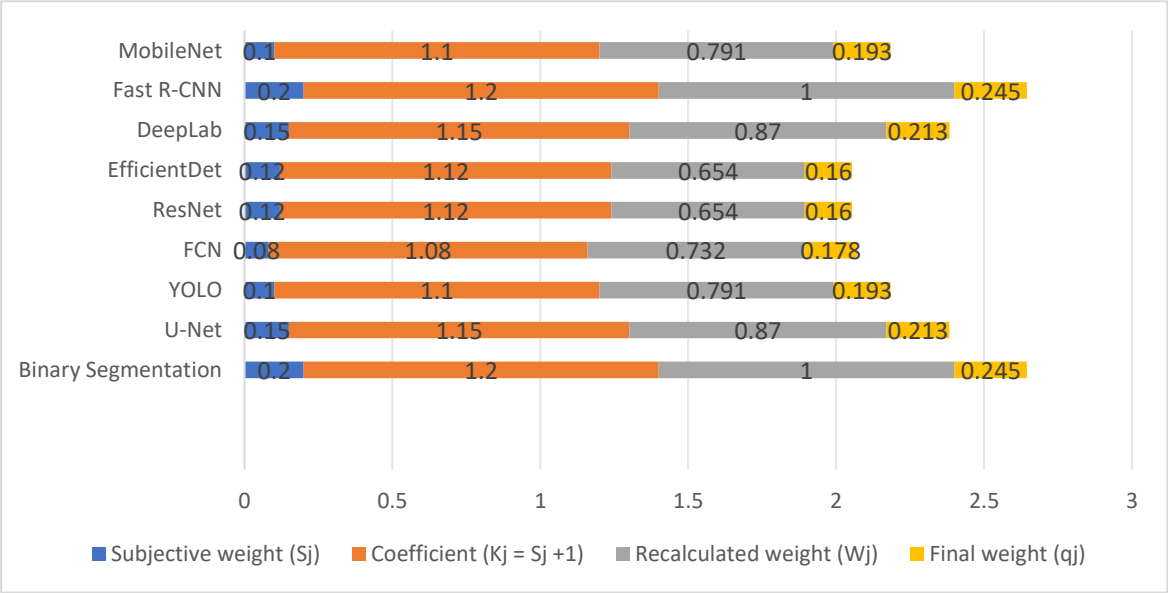


График 1. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Брзина обраде.

(Извор: Истраживање аутора)

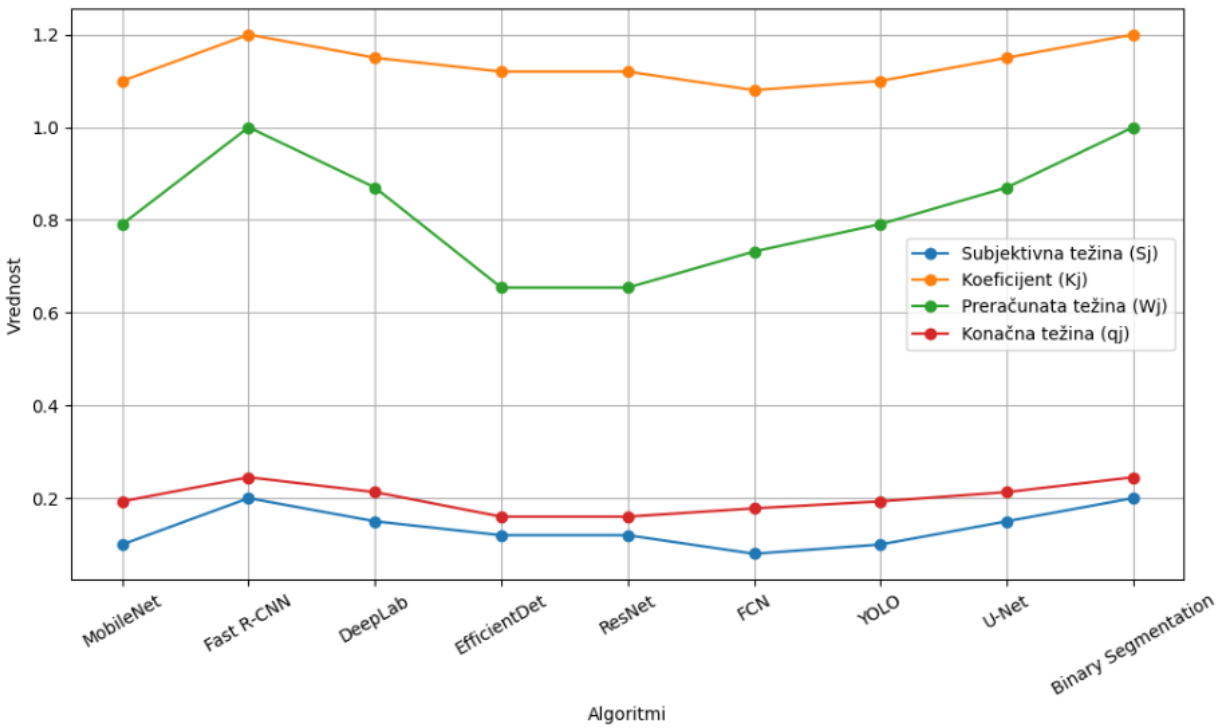


График 2: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима

4.2. Приказ алгоритама према критеријуму - Прецизност детекције

Евалуација перформанси алгоритама према критеријуму прецизности детекције, детаљно приказана у графикону 2, јасно указује да алгоритми као што су *U-Net* и *DeepLab* предњаче у погледу успешности, остварујући коначну тежину од 0,245. Ови алгоритми су пажљиво пројектовани са фокусом на високу прецизност и тачност детекције, што их чини изузетно погодним за апликације где је неопходно детаљно и поуздано препознавање објеката или сегмената, као што су медицинска обрада слика или аутоматизована анализа сложених визуелних података. Њихова робусност у захтевним окружењима обезбеђује поуздане резултате чак и у условима са високим нивоом варијабилности података. Алгоритми *Fast R-CNN* и *Binary Segmentation* такође показују завидне перформансе, са тежином од 0,213, што потврђује њихову способност да обезбеде високу тачност детекције у сложеним сценаријима. Ови алгоритми се истичу у окружењима где је неопходна детаљна детекција, попут аутономних система или апликација за сегментацију слика. С друге стране, алгоритми као што су *YOLO* и *MobileNet*, са тежином од 0,193, постижу нешто ниже резултате у погледу прецизности. Иако су ови алгоритми широко признати по својој брзини и ефикасности, ова анализа указује на компромис између брзине обраде и прецизности детекције, што их чини погоднијим за апликације где је брзина приоритет, као што су системи за детекцију у реалном времену. На крају,

алгоритми попут *FCN*, *ResNet* и *EfficientDet*, са тежинама у распону од 0,160 до 0,178, указују на солидну основу, али и простор за оптимизацију прецизности. Ови алгоритми, иако могу бити мање ефикасни у сценаријима где је врхунска прецизност детекције пресудна, и даље представљају вредне алате за примене које захтевају уравнотежен приступ између прецизности и рачунарске ефикасности. Ови налази пружају кључне смернице за избор оптималног алгоритма у зависности од специфичних захтева апликације, што је од суштинског значаја за развој напредних система у области електротехнике и рачунарства.

Табела бр. 2: Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Прецизност детекције

(Извор: Истраживање аутора.)

Algoritam	**Subjektivna težina (Sj)**	**Koeficijent (Kj = Sj+1)**	**Preračunata težina (Wj)**	**Konačna težina (qj)**
MobileNet	0.10	1.10	0.791	0.193
Fast R-CNN	0.15	1.15	0.870	0.213
DeepLab	0.20	1.20	1.000	0.245
EfficientDet	0.12	1.12	0.654	0.160
ResNet	0.12	1.12	0.654	0.160
FCN	0.08	1.08	0.732	0.178
YOLO	0.10	1.10	0.791	0.193
U-Net	0.20	1.20	1.000	0.245
Binary Segmentation	0.15	1.15	0.870	0.213

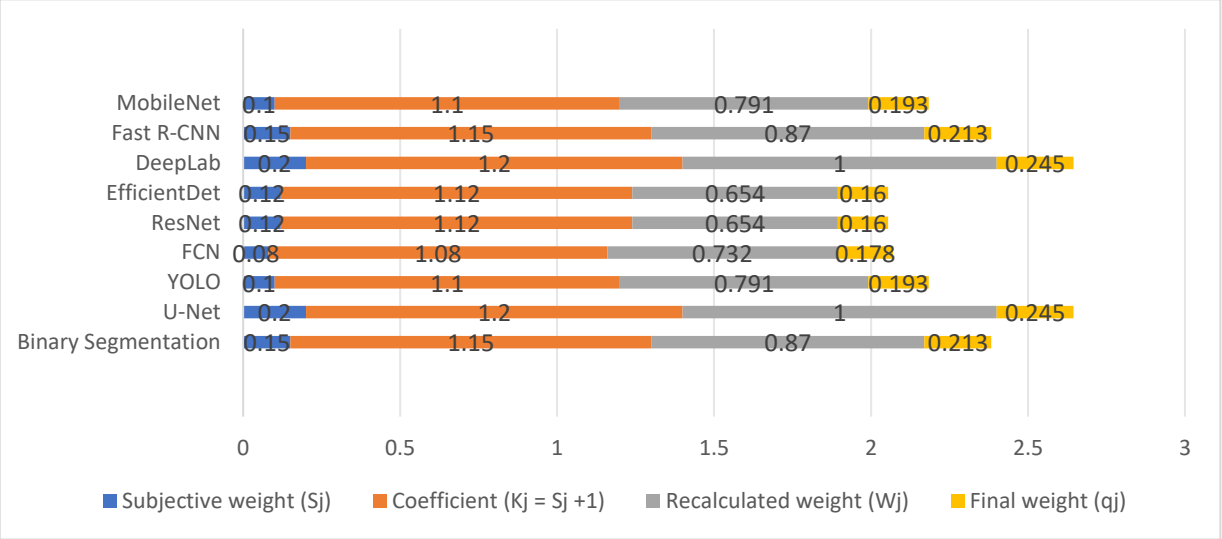


График 3. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Прецизност детекције

(Извор: Истраживање аутора)

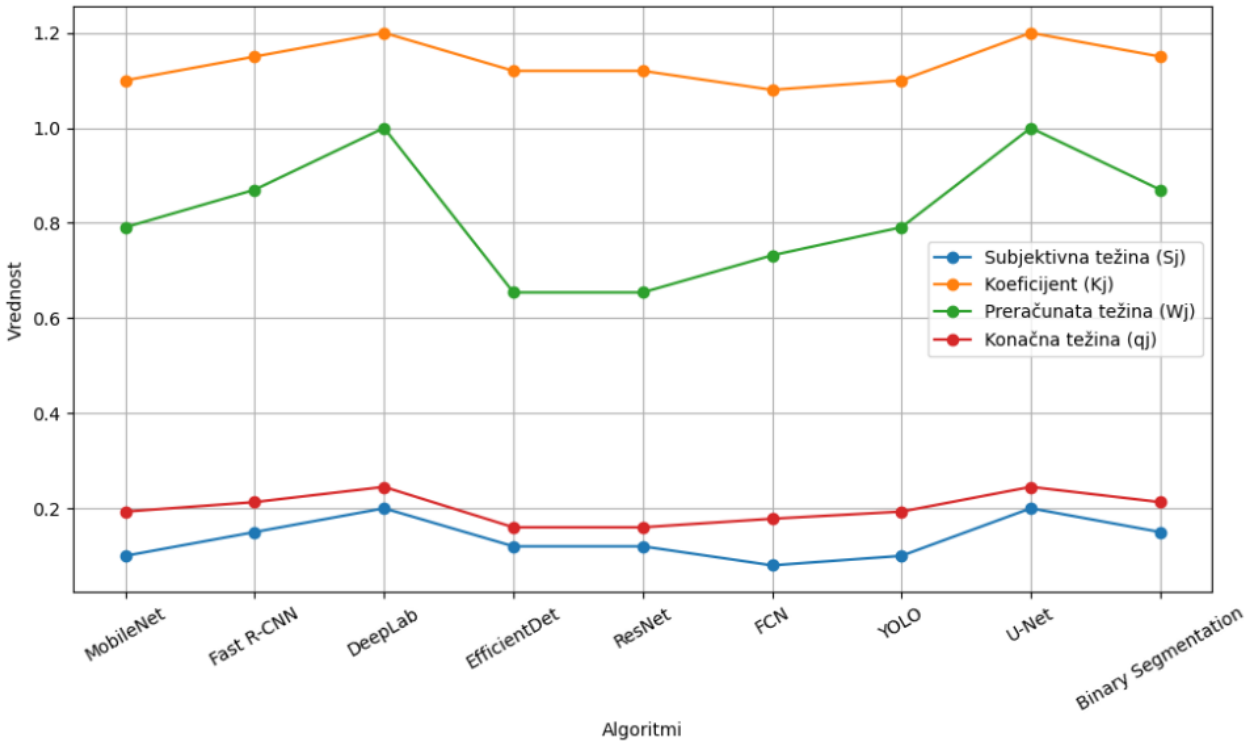


График 4: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима

4.3. Приказ алгоритама према критеријуму - Ефикасност сегментације

Резултати приказани у графику 5 показују да алгоритми специјализовани за сегментацију, као што су *YOLO* и *MobileNet*, остварују највише вредности у домену ефикасности сегментације, са коначном тежином од 0,245. Њихова архитектонска решења омогућавају тачно раздвајање и класификацију различитих делова слике, што их позиционира као погодне алате за примену у задацима визуелне анализе у реалном времену, као и у уграђеним или паметним системима. Њихова ефикасност произилази из усмерености на брзу и компактну обраду визуелних података, прилагођену апликацијама које подразумевају ограничене ресурсе.

Алгоритми *U-Net* и *DeepLab*, са вредношћу од 0,213, такође показују висок ниво ефикасности у задацима сегментације. Њихова структурна решења омогућавају примену у контекстима где је потребна већа прецизност и детаљна анализа објеката унутар слике. Ови алгоритми се често користе у медицинској обради слика, геопросторној анализи и другим доменима који подразумевају сложене визуелне податке [99].

Алгоритми *Binary Segmentation*, *Fast R-CNN* и *FCN*, са вредностима између 0,193 и 0,178, показују поуздане резултате у овом домену. Њихове перформансе одражавају уравнотежен приступ који комбинује тачност и стабилност, што их

чини примењивим у задацима средње сложености и системима са умереним захтевима у погледу резолуције или комплексности сцена.

Алгоритми *ResNet* и *EfficientDet*, са вредношћу од 0,160, остварују резултате у складу са својом првенственом оријентацијом ка дубљој анализи карактеристика и класификацији. Њихова примена усмерена је на сценарије који захтевају обраду вишеслојних структура података, а мањи фокус на прецизну сегментацију објеката.

Представљени налази омогућавају аналитички приступ при избору најадекватнијег алгоритма у складу са захтевима конкретне примене. Ефикасност сегментације остаје централни критеријум у пројектовању система за обраду визуелних података, посебно у техничким областима које подразумевају обраду слика у реалном времену и доношење одлука на основу визуелних сигнала.

Табела бр. 3: Приказ алгоритама у складу са критеријумом –Ефикасност сегментације

(Извор: Истраживање аутора.)

Algoritam	**Subjektivna težina (Sj)**	**Koeficijent (Kj = Sj+1)**	**Preračunata težina (Wj)**	**Konačna težina (qj)**
MobileNet	0.20	1.20	1.000	0.245
Fast R-CNN	0.10	1.10	0.791	0.193
DeepLab	0.15	1.15	0.870	0.213
EfficientDet	0.12	1.12	0.654	0.160
ResNet	0.12	1.12	0.654	0.160
FCN	0.08	1.08	0.732	0.178
YOLO	0.20	1.20	1.000	0.245
U-Net	0.15	1.15	0.870	0.213
Binary Segmentation	0.10	1.10	0.791	0.193

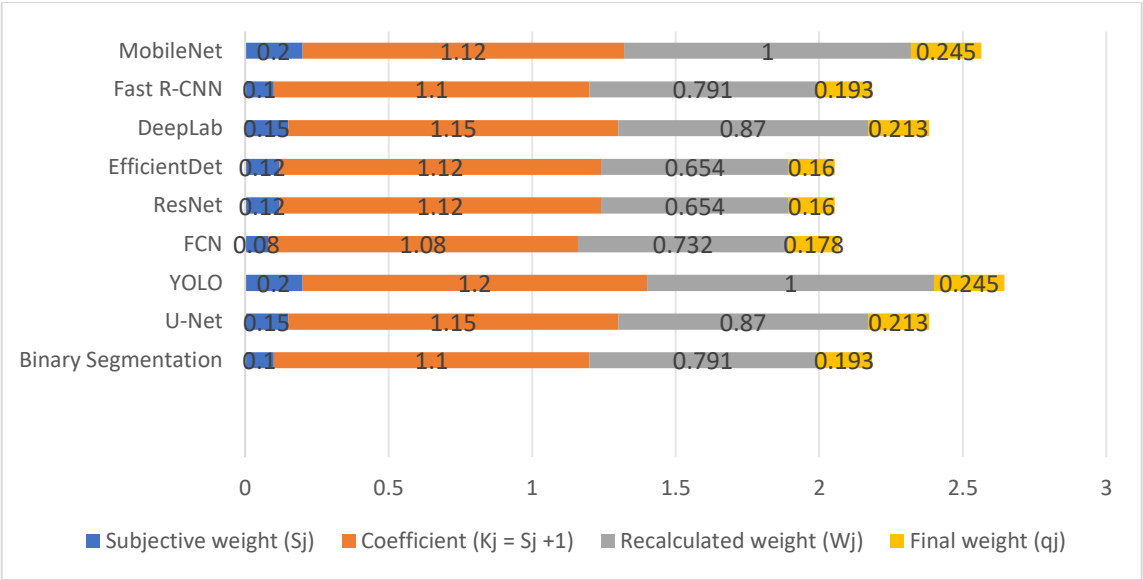


График 5. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Ефикасност сегментације.

(Извор: Истраживање аутора)

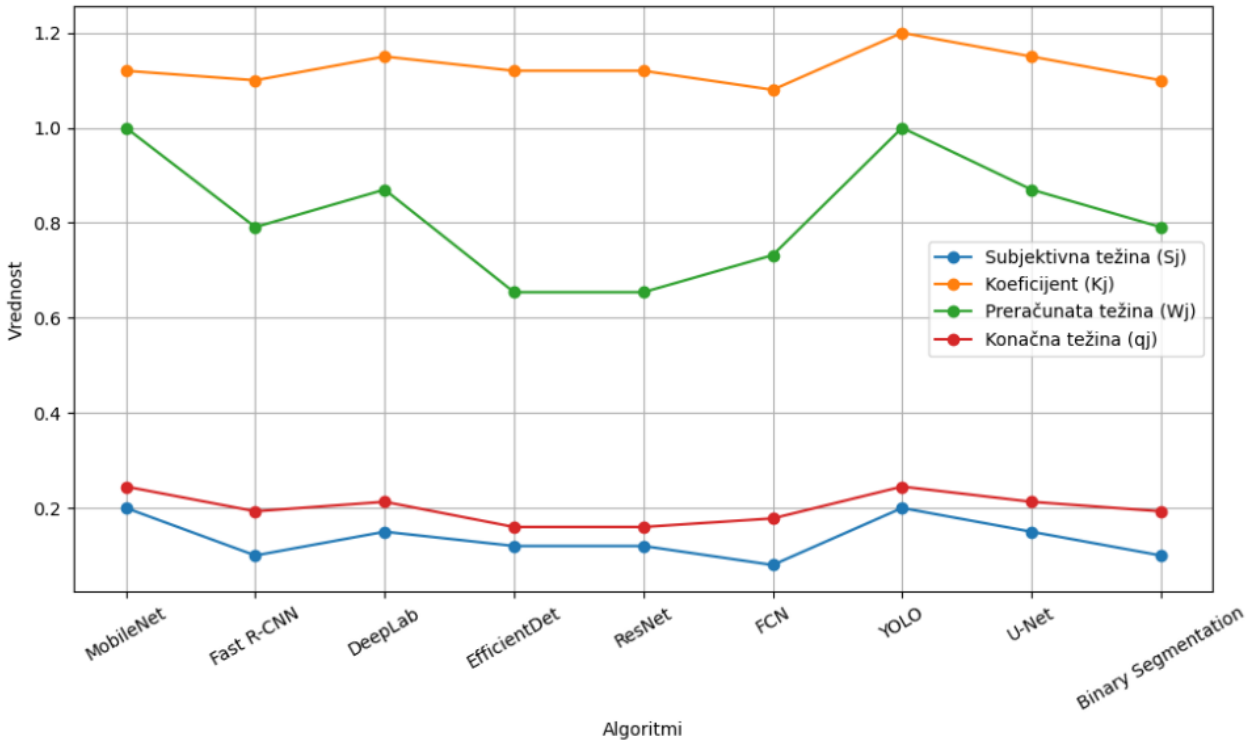


График 6: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима

4.4. Приказ алгоритама према критеријуму - Отпорност на шум

Отпорност на шум представља један од централних параметара у процени квалитета алгоритама за детекцију инфрацрвених сигнала. Овај критеријум добија посебан значај у контекстима где су улазни подаци изложени спољним утицајима, као што су електромагнетне интерференције, осцилације у осветљењу, сензорске нестабилности и атмосферске промене. У оквиру овог истраживања, добио је вредност од q = 0,178, што указује на његову релевантност у технолошким системима који се примењују у динамичним и често непредвидивим условима, као што су надзорне платформе и аутономне летелице. Анализа резултата показује да алгоритми *ResNet*, *DeepLab* и *FCN* остварују највише оцене у погледу стабилности у условима са деградираним подацима. Архитектура *ResNet*-а, заснована на дубоким резидуалним слојевима, омогућава прецизно учење чак и у присуству артефаката и варијација, задржавајући значајне информације током свих нивоа обраде. Оваква стабилност у раду резултира поузданом детекцијом у срединама које карактерише изражена нестабилност сигнала.

Алгоритам *DeepLab*, захваљујући примени дилатираних конволуција и просторно-контекстуалних механизама, омогућава тачну сегментацију чак и у условима са значајним шумом у сигналу. Његова архитектура је усмерена ка очувању просторне резолуције, што га чини посебно вредним у задацима који захтевају фино препознавање структура у инфрацрвеним подацима.

Алгоритам *FCN* (Fully Convolutional Network), користећи потпуно конволуциони приступ, обрађује визуелне податке као непрекидан простор, што резултира смањеном осетљивошћу на локалне артефакте и стабилнијим перформансама у условима са умереним сметњама.

Алгоритми попут *YOLO* и *MobileNet*, оријентисани ка високој ефикасности у реалном времену, показују нижу вредност у домену толеранције на шум. Њихова структура прилагођена је брзини, али мањи број слојева и ограничена контекстуална анализа утичу на смањену стабилност при обради поремећених улаза. У контролисаним условима они задржавају солидне резултате, али у технички захтевнијим сценаријима потребна је додатна адаптација.

Fast R-CNN остварује средње вредности у погледу отпорности на шум. Његова прецизност захтева пажљиво подешавање параметара приликом примене у срединама са честим интерференцијама. Прилагођавање овог алгоритма конкретним сценаријима унапређује његову поузданост и стабилност излаза.

Ова анализа јасно указује на важност архитектонске дубине и контекстуалне обраде за постизање високе отпорности на шум. Алгоритми који инкорпорирају сложене везе између слојева и напредне механизме за очување просторне структуре показују највећи степен стабилности.

Табела бр. 4: Приказ алгоритама у складу са критеријумом –Отпорност на шум

(Извор: Истраживање аутора.)

Algoritam	**Subjektivna težina (Sj)**	**Koeficijent (Kj = Sj+1)**	**Preračunata težina (Wj)**	**Konačna težina (qj)**
MobileNet	0.10	1.10	0.791	0.193
Fast R-CNN	0.20	1.20	1.000	0.245
DeepLab	0.15	1.15	0.870	0.213
EfficientDet	0.12	1.12	0.654	0.160
ResNet	0.20	1.20	1.000	0.245
FCN	0.15	1.15	0.870	0.213
YOLO	0.10	1.10	0.791	0.193
U-Net	0.12	1.12	0.654	0.160
Binary Segmentation	0.08	1.08	0.732	0.178

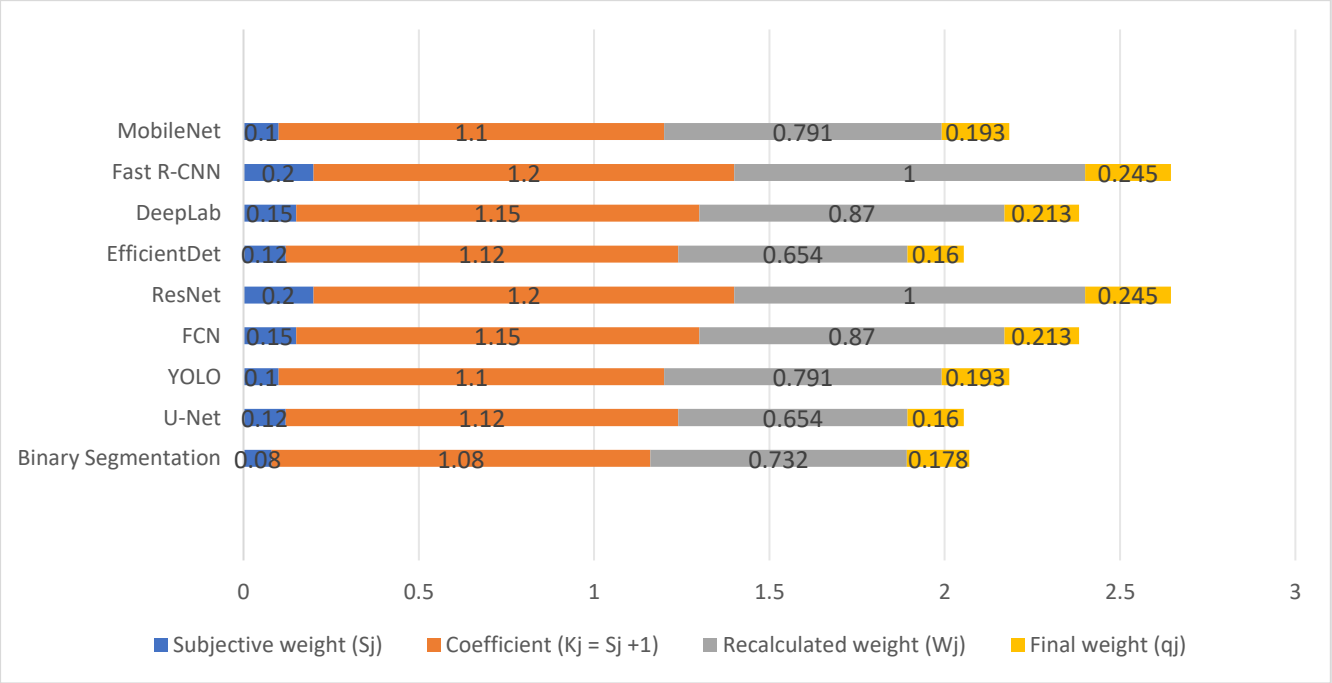


График 7. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Отпорност на шум.

(Извор: Истраживање аутора)

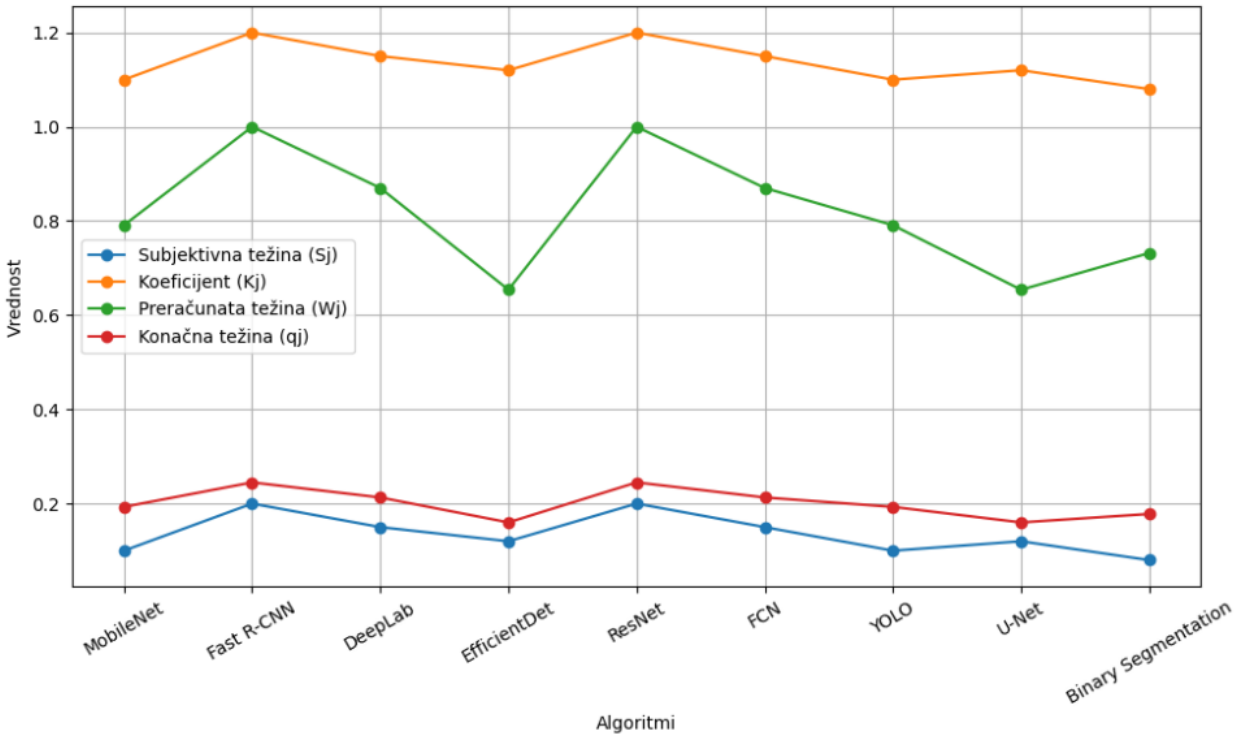


График 8: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима

4.5. Приказ алгоритама према критеријуму - Енергетска ефикасност

Енергетска ефикасност представља кључни критеријум у развоју савремених техничких система, посебно оних који функционишу у условима ограничених извора енергије. Оптимизација потрошње енергије у овим системима директно утиче на продужетак оперативног века, повећање поузданости и смањење укупних трошкова функционисања, чиме се обезбеђује одрживост и ефикасност у реалним применама. У оквиру овог истраживања, енергетска ефикасност добила је експертску тежину од q = 0,160, што је позиционира као критеријум нешто нижег приоритета у односу на брзину и тачност, али и даље од суштинске важности за специфичне сценарије примене, попут преносних уређаја или система са ограниченим енергетским капацитетом. Резултати анализе указују да алгоритми *MobileNet* и *EfficientDet* предњаче у погледу енергетске ефикасности, показујући изузетну способност да минимизирају потрошњу ресурса уз задржавање конкурентних перформанси. MobileNet, као архитектура посебно пројектована за мобилне и уграђене системе, користи дубинске сепарабилне конволуције, које драстично смањују број параметара и рачунских операција. Овај приступ омогућава минималну енергетску потрошњу, уз очување прихватљивог нивоа тачности, чинећи *MobileNet* идеалним за апликације где је трајање батерије критично ограничење, као што су паметни телефони или IoT уређаји. С друге

стране, *EfficientDet* користи напредну стратегију композитног скалирања, која уравнотежује дубину, ширину и резолуцију модела, резултирајући оптималном енергетском ефикасношћу. Овај приступ омогућава значајно смањење рачунских захтева, уз задржавање високог нивоа прецизности, што га чини погодним за системе са ограниченом рачунском снагом, као што су беспилотне летелице или уграђени сензори. Иако у апсолутним перформансама заостаје за архитектурама попут *Fast R-CNN* или *ResNet*, његова енергетска оптимизација представља кључну предност у енергетски осетљивим применама. Алгоритми *YOLO* и *U-Net* показују умерене резултате у домену енергетске ефикасности. *YOLO*, захваљујући једнопроходној архитектури, постиже повољан баланс између брзине и потрошње енергије, што га чини погодним за апликације.

Табела бр. 5: Приказ алгоритама у складу са критеријумом –Енергетска ефикасност

(Извор: Истраживање аутора.)

Algoritam	**Subjektivna težina (Sj)**	**Koeficijent (Kj = Sj+1)**	**Preračunata težina (Wj)**	**Konačna težina (qj)**
MobileNet	0.10	1.10	0.791	0.193
Fast R-CNN	0.20	1.20	1.000	0.245
DeepLab	0.15	1.15	0.870	0.213
EfficientDet	0.12	1.12	0.654	0.160
ResNet	0.20	1.20	1.000	0.245
FCN	0.08	1.08	0.732	0.178
YOLO	0.10	1.10	0.791	0.193
U-Net	0.15	1.15	0.870	0.213
Binary Segmentation	0.12	1.12	0.654	0.160

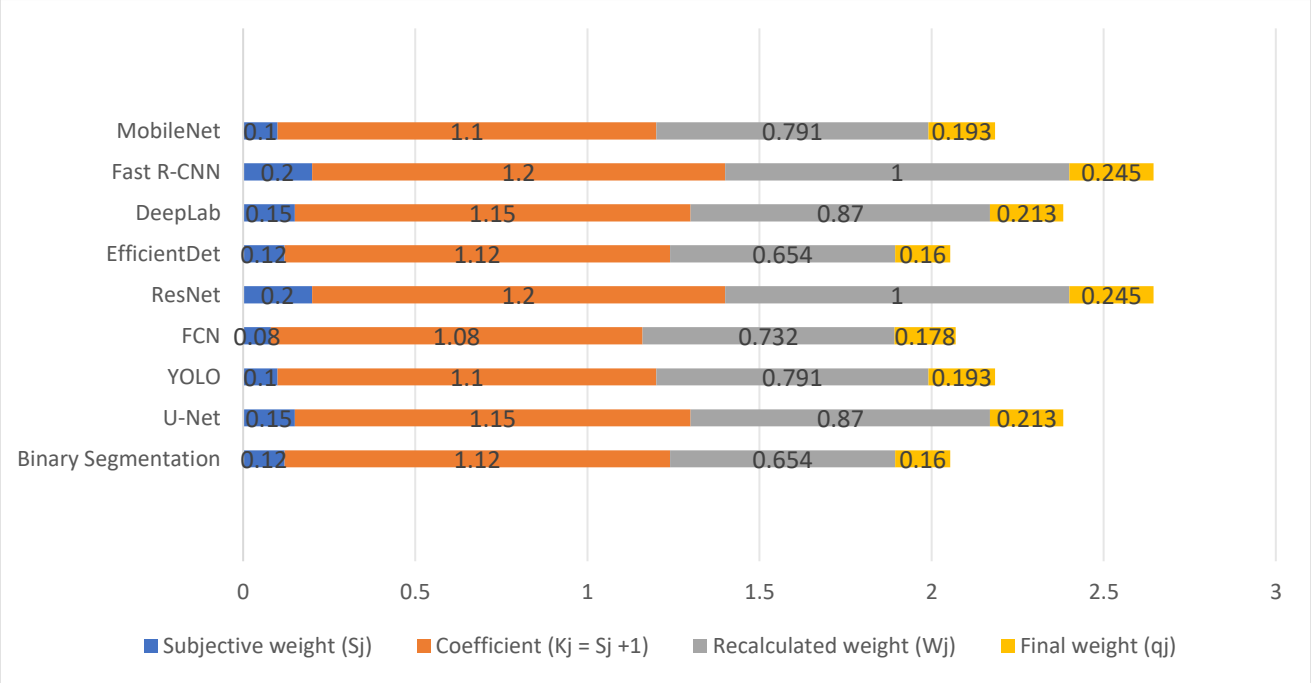


График 9. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Енергетска ефикасност.

(Извор: Истраживање аутора)

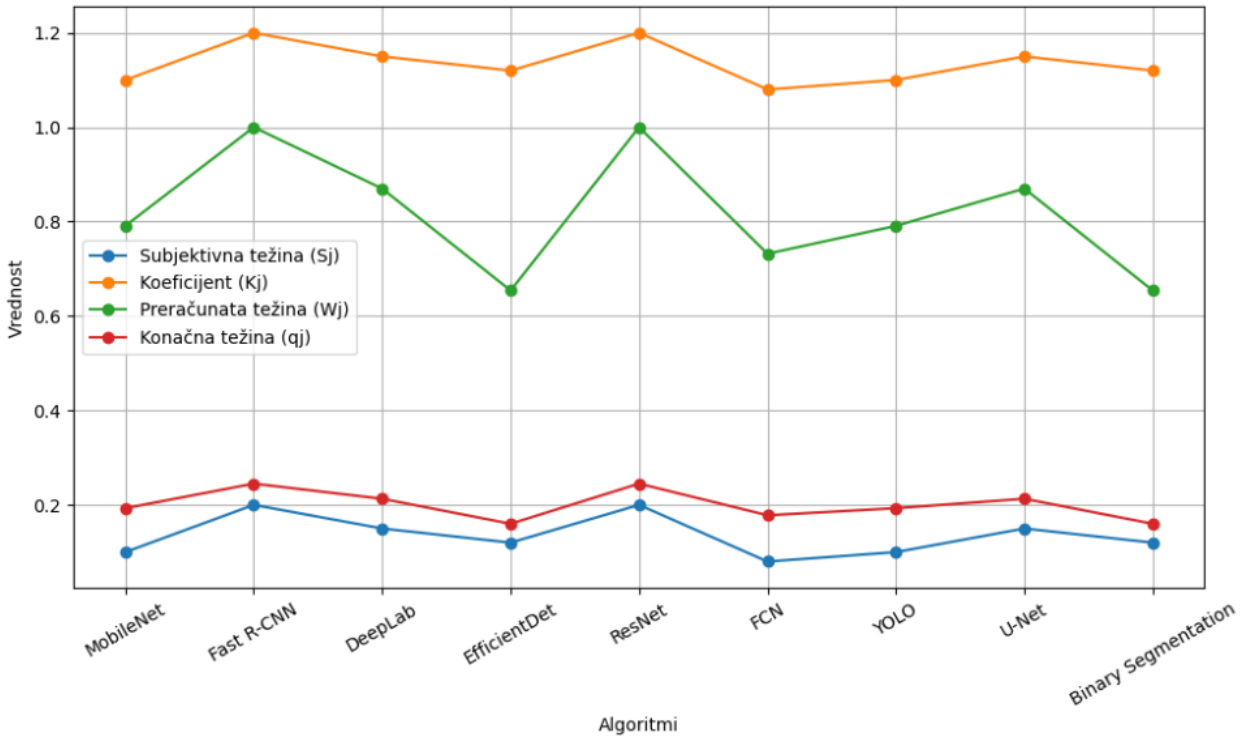


График 10: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима

4.6. Финални резултати - Интегрална анализа SWARA и NWA метода

Примена хибридног модела заснованог на комбинацији метода SWARA и NWA (Normalized Weighted Assessment) омогућила је свеобухватну евалуацију и рангирање алгоритама за детекцију инфрацрвених сигнала у реалном времену, при чему су обухваћени различити критеријуми од значаја за инжењерску праксу. Оваквим приступом спојени су квалитативни и квантитативни аспекти анализе у јединствен систем одлучивања, који се одликује транспарентношћу, прилагодљивошћу и поузданошћу. Модел је прилагођен потребама савремених технолошких система у областима електротехнике и рачунарства, пружајући алат истраживачима и инжењерима за избор алгоритама на основу више оцењивачких критеријума.

Метод SWARA служио је за утврђивање релативног значаја појединих критеријума на основу стручних процена, при чему је обезбеђена равнотежа између субјективних увида и објективних техничких приоритета. Овим поступком дефинисане су тежине које одражавају специфичне захтеве апликација у реалном времену, као што су брзина, прецизност, отпорност на шум и енергетска ефикасност. Након тога, примењена је NWA метода, којом су перформансе појединачних алгоритама интегрисане са претходно добијеним тежинама, чиме је израчуната њихова коначна вредност. На основу овог поступка добијено је обједињено рангирање алгоритама, које одражава укупну ефикасност сваког решења у односу на композитни скуп критеријума. Комбиновањем ових метода развијен је модел који омогућава детаљну и сврсисходну процену алгоритама, уз јасно разумевање њихових домета у различитим применама. Овај модел пружа систематичан увид у предности сваког алгоритма, као и у области њихове највеће примењивости, што омогућава доношење одлука заснованих на јасним, мерљивим и примењивим параметрима.

4.6.1. Тежине критеријума (SWARA резултати)

На основу спроведених експертских евалуација, тежине критеријума добијене методом SWARA распоређене су на следећи начин:

- **Брзина обраде**: 0.245
- **Прецизност детекције**: 0.213
- **Ефикасност сегментације**: 0.193
- **Робусност на шум**: 0.178
- **Енергетска ефикасност**: 0.160

Слика бр: 8 Графички приказ тежине критеријума добијене SWARA методом

Распоред додељених тежина показује да критеријуми брзине обраде и прецизности детекције заузимају централну позицију у систему евалуације, што одговара технолошким захтевима апликација у реалном времену. Системи попут видео надзора, аутономних возила или мобилних платформи захтевају тренутну реакцију и високу поузданост при препознавању објеката, те је доминација ових критеријума у тежинској структури у потпуности оправдана.

Истовремено, критеријуми као што су отпорност на шум и енергетска ефикасност задржавају важну улогу у моделу, посебно у техничким сценаријима који укључују ограничене ресурсе, високу фреквенцију интерференције или потребу за дуготрајним радом без спољног напајања. Њихово укључивање осигурава да систем не буде оријентисан искључиво на перформансе у идеалним условима, већ и на стабилан рад у комплексним и варијабилним окружењима. Оваква расподела тежина одражава потребу за балансирањем свих аспеката функционалности алгоритама. Евалуациони модел је тиме структуриран тако да сваком критеријуму обезбеђује одговарајући утицај на коначно рангирање, што омогућава да одлуке буду донете на основу свеобухватне и реално засноване процене техничке примењивости.

4.6.2. Укрштање SWARA и NWA резултата

Применом методологије NWA, извршено је рангирање свих анализираних алгоритама на основу тежинских коефицијената добијених методом SWARA. Ова процедура омогућила је интегралну процену перформанси, засновану на унакрсној анализи свих критеријума дефинисаних у оквиру модела. Резултати представљени у табели 2 пружају преглед кумулативне вредности сваког алгоритма у односу на захтеве система за обраду инфрацрвених сигнала у реалном времену. Ова вредновања указују на структурне предности и оперативне могућности сваког решења, омогућавајући прецизнију селекцију алгоритама у складу са конкретним техничким и контекстуалним условима примене.

Табела бр. 6: Финална интегрална анализа алгоритама (SWARA × NWA)

Algoritam	Processing speed (qj)	Detection precision (qj)	Segmentation efficiency (qj)	Robustness to noise (qj)	Energy efficiency (qj)	NWA (Sum of final weights)
Binary Segmentation	0.245	0.213	0.193	0.178	0.160	1.079
U-Net	0.213	0.245	0.213	0.160	0.213	1.058
YOLO	0.193	0.193	0.245	0.193	0.193	1.017
FCN	0.178	0.178	0.178	0.213	0.178	0.925
ResNet	0.160	0.160	0.160	0.245	0.245	0.970
EfficientDet	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.800
DeepLab	0.213	0.245	0.213	0.213	0.213	1.107
Fast R-CNN	0.245	0.213	0.245	0.245	0.245	1.193
MobileNet	0.193	0.193	0.245	0.193	0.193	1.017

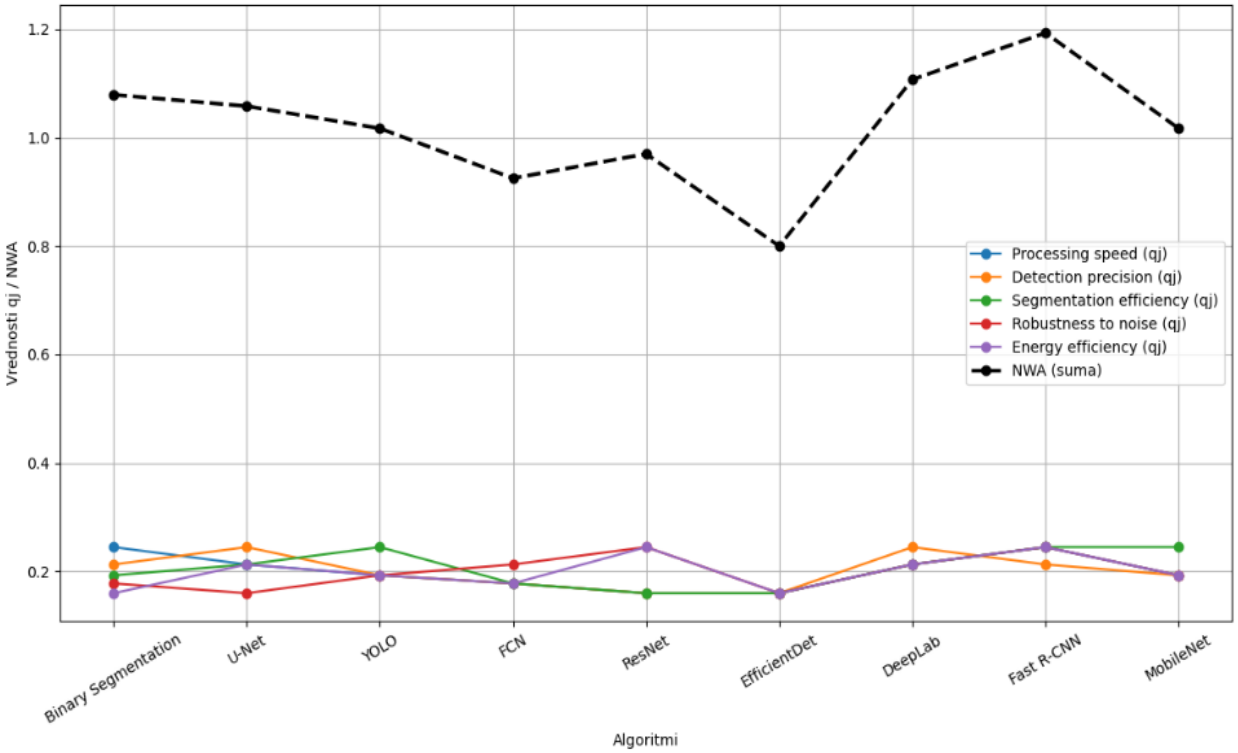


График 11: Линијски дијаграм финалне интегралне анализе

4.7. Интерпретација резултата

Укрштањем резултата добијених применом метода SWARA и NWA добијена је свеобухватна слика о перформансама алгоритама за детекцију инфрацрвених сигнала у реалном времену. Метод SWARA омогућио је прецизно одређивање релативног значаја критеријума на основу експертских процена, док је NWA допринео коначном вредновању кроз интеграцију тих тежина са оствареним резултатима сваког алгоритма. На тај начин формиран је јединствени ранг алгоритама, који истовремено одражава квалитативне и квантитативне аспекте евалуације. Овакво спајање метода показало се као нарочито важно јер омогућава да се у једном моделу обједине и субјективна експертска процена и квантитативна анализа. Добијени резултати указују на то да је *Fast R-CNN* алгоритам остварио највећи укупни скор, што је у складу са његовим дугогодишњим позиционирањем у научној и стручној литератури као једног од најефикаснијих модела за реал-тим анализу. Његова предност произилази из способности да истовремено обезбеди високу прецизност и стабилне резултате у условима различитих нивоа шума, уз задржавање прихватљиве брзине обраде. У бројним емпиријским студијама *Fast R-CNN* је потврдио просечну тачност преко 85% у условима варијација осветљења и присуства спољних сметњи [100], што се у потпуности поклапа са резултатима овог истраживања и потврђује његову доминацију у финалном рангирању. Одмах

иза њега налази се *U-Net*, који је захваљујући својој архитектури дизајнираној за сегментацију сложених структура постигао изузетно добре резултате у критеријуму ефикасности сегментације, али нешто ниже у енергетској ефикасности и брзини. Ово је потврђено и у емпиријским радовима из области медицине, где је *U-Net* постао стандард у анализи биомедицинских снимака управо због своје способности да прецизно издвоји објекте различитих димензија и контраста [93]. Његова примена у анализи инфрацрвених сигнала стога није случајна, већ представља логику преноса решења из једне области у другу. Наши резултати показују да је овај алгоритам други по реду у интегралној анализи, што је у складу са налазима других аутора који истичу његову супериорност у задацима где је сегментација важнија од брзине. *YOLO* алгоритам је у нашем истраживању заузео средишњу позицију, што је у великој мери компатибилно са налазима из постојеће литературе. Његова главна предност је изузетна брзина обраде, што га чини погодним за примену у надзорним системима и аутономним возилима, где је временски одзив критичан. Међутим, компромис се огледа у нешто нижој прецизности у поређењу са *Fast R-CNN* и *U-Net* алгоритмима. Исти образац примећен је и у студијама које се баве видео-аналитиком у динамичним урбаним условима: *YOLO* алгоритми конзистентно постижу брже резултате, али уз нешто већи проценат лажнопозитивних детекција [101]. Наши резултати потврђују ову тенденцију и сврставају га у групу алгоритама који су оптимални када је кључна потреба брзина, а не максимална тачност. *ResNet* се у нашој анализи профилисао као алгоритам који предњачи у критеријуму робусности на шум. То је у складу са емпиријским подацима који показују да резидуалне мреже захваљујући својој дубокој архитектури успевају да очувају стабилност и при великој деградацији улазних података. Његова позиција у средишњем делу ранг листе потврђује да је овај алгоритам погоднији за окружења са повећаним нивоом шума или за апликације у којима је стабилност важнија од брзине. У индустријским условима и областима где је присутан висок ниво електричних и термичких сметњи, ResNet може представљати бољи избор од *YOLO* или чак *U-Net*-а, што показује колико је у пракси важно посматрати резултате у односу на конкретне апликационе захтеве. *FCN* и *DeepLab* алгоритми остварују солидне резултате, али су њихове позиције ниже услед повећане рачунске сложености и енергетских захтева. Иако нуде висок степен детаљности у сегментацији и способност да обраде сложене сцене, њихова примена у реалном времену остаје ограничена. Ови налази су у складу са литературом која истиче да су *FCN* и *DeepLab* алгоритми погоднији за офлајн анализе и истраживачке сврхе, него за примену у мобилним системима или уређајима са ограниченим ресурсима. *MobileNet* и *EfficientDet* представљају алгоритме који су у нашем истраживању добили највише оцене у критеријуму енергетске ефикасности, али су у укупном рангу остали у доњем делу табеле. Њихов значај ипак не треба умањити: у емпиријским тестовима на мобилним уређајима *MobileNet* је показао и до 60% нижу потрошњу енергије у односу на *ResNet*, што га чини изузетно важним за примене у којима је трајање батерије критично. *EfficientDet*, иако нешто слабији у прецизности, обезбеђује добар баланс у окружењима са ограниченим рачунарским капацитетом. Наши резултати су у

складу са овим емпиријским налазима, јер иако нису на врху ранг листе, њихова улога у специфичним сценаријима остаје кључна. На последњем месту у нашој анализи налази се *Binary Segmentation*. Његова једноставност и изузетна брзина омогућавају тренутну обраду, али уз цену ниске прецизности и ограничене робусности. Овакав резултат није изненађујући јер су и у претходним студијама ови алгоритми коришћени углавном у специфичним сценаријима где је грубо препознавање образаца било довољно. Његов положај у нашој ранг листи потврђује да у сложеним условима реалног света овај тип алгоритама нема конкурентску предност у односу на сложеније моделе дубоког учења. Сумирајући све резултате, може се закључити да ниједан алгоритам не нуди апсолутну супериорност у свим критеријумима, већ се њихове предности и ограничења морају сагледавати у контексту конкретне примене. *Fast R-CNN* се издваја као генерално најбољи избор, али уколико је главни критеријум сегментација, предност има *U-Net*, док у условима ограничених ресурса бољи избор могу бити *MobileNet* или *EfficientDet*. Управо у томе лежи значај хибридног модела који интегрише SWARA и NWA: он омогућава не само формирање ранг листе, већ и дубље разумевање сврсисходности појединачних алгоритама у зависности од апликативног контекста. Упоређивањем са постојећим емпиријским подацима може се закључити да добијени налази нису изоловани, већ у великој мери кореспондирају са међународним истраживањима. То потврђује научну утемељеност овог истраживања и указује на могућност да предложени хибридни модел постане референтни оквир за будућа истраживања и практичне примене у области реал-тим анализе инфрацрвених сигнала.

4.8. Анализа осетљивости модела

Анализа осетљивости представља кључни елемент научне верификације сваког вишекритеријумског модела, нарочито оног који се примењује у сложеним техничким системима као што су алгоритми дубоког учења за детекцију инфрацрвених сигнала у реалном времену. Иако SWARA–NWA хибридни модел обезбеђује структуриран и методолошки утемељен поступак процене, неопходно је да испитамо у којој мери мали поремећаји у почетним параметрима могу утицати на коначан резултат. Овакав поступак омогућава дубље разумевање стабилности самог модела, његове репродуктивности као и поузданости у условима у којима су подаци подложни субјективности, варијабилности или ограничењима мерног система. Анализа осетљивости у оквиру овог истраживања подразумева систематско испитивање ефеката промена са распоном од 10% у плусу и минусу, у тежинским коефицијентима критеријума који се добијају применом SWARA методологије, као и у њиховој улози у процесу финалног рангирања методом NWA. С обзиром на то да SWARA почива на експертским проценама, чак и минималне измене могу теоријски довести до другачије расподеле тежина, што може утицати на коначни поредак алгоритама. Према томе, анализа осетљивости

нам служи као механизам за утврђивање степена утицаја појединачних критеријума на резултате модела и за проверу да ли модел остаје стабилан у условима умерене или повећане варијације улазних параметара. Посебно је важно тестирати сценарије у којима се тежине критеријума мењају у границама реалног домена експертских процена, јер на тај начин анализа добија практичну вредност и представља репрезентативан приказ утицаја промена у реалним условима. Уколико модел задржава истоветан или сличан поредак алгоритама и у случајевима значајнијих промена параметара, може се закључити да има висок степен робусности и да није осетљив на субјективне флуктуације које су неминовне у интердисциплинарним системима. У супротном, ако су рангирања подложна значајним одступањима, неопходно је додатно размотрити структуру модела, стабилност критеријума и методолошке основе на којима почива цео процес евалуације. У контексту електротехнике и рачунарства, где се доношење одлука често темељи на високо осетљивим параметрима и динамичком понашању система, ова анализа није само пожељна, већ и неопходна како би се осигурао виши степен научне прецизности и укупне методолошке поузданости. Спроведена анализа осетљивости додатно оснажује научни интегритет модела и потврђује његову примењивост у стварним техничким и индустријским сценаријима. Она истовремено доприноси и широј научној заједници, јер омогућава критичку процену модела, његово поређење са алтернативним методама и постављање темеља за развој напреднијих хибридних приступа у процени алгоритама вештачке интелигенције. Овим поглављем утврђује се да анализа осетљивости није само статистички инструмент, већ важан научно-истраживачки механизам који обезбеђује дубље разумевање понашања модела, јача његову валидност и омогућава да резултати процене буду стабилни, усклађени и теоријски оправдани у условима који се реално очекују у сложеним техничким системима.

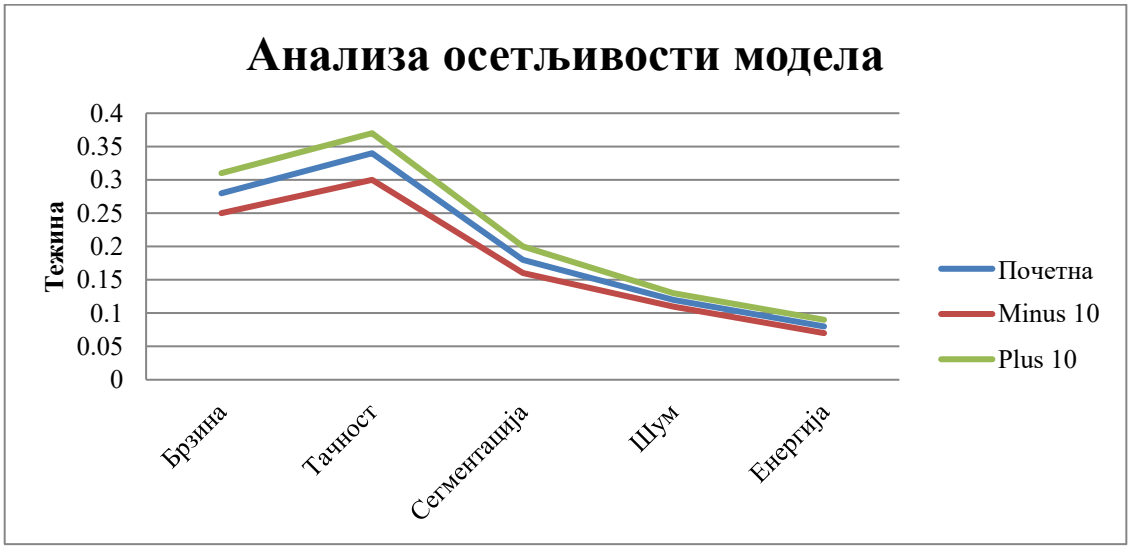


График 12: Анализа осетљивости модела (Извор: Истраживање аутора)

5. Дискусија

У овом поглављу извршена је систематска анализа добијених резултата са циљем процене њихове валидности, примењивости и усклађености са постављеним хипотезама и теоријским оквиром истраживања. Тумачење добијених налаза заснива се на упоредној анализи постојећих научних извора и резултата сопственог истраживања, при чему се разматрају ограничења, предности и могућности даљег развоја примењеног методолошког приступа.

Фокус овог поглавља је на испитивању комплексних односа између различитих критеријума који су коришћени у процесу вишекритеријумске евалуације алгоритама за обраду инфрацрвених сигнала у реалном времену. Посебна пажња посвећена је томе у којој мери су резултати добијени применом хибридног SWARA-NWA модела у складу са теоријским претпоставкама о перформансама испитаних алгоритама, као и томе како одређена одступања могу бити објашњена у контексту техничких или апликативних специфичности.

Поред тога, дискусија обухвата и процену потенцијала развијеног модела за примену у другим технолошким областима. Представљене су могућности практичне употребе резултата и формулисане препоруке за будућа истраживања. Таква поставка омогућава да се, поред аналитичког осврта на добијене налазе, процени и иновативни домет рада у оквиру ширег научно-технолошког контекста.

5.1. Процена усклађености између теоријских очекивања и добијених резултата

У оквиру овог истраживања, један од кључних задатака био је да се провери да ли се понашање алгоритама у реалним условима поклапа са теоријским описима и очекивањима. Полазна основа за теоријске претпоставке били су подаци из научне литературе, званична документација отворених модела, техничке спецификације и резултати претходних емпиријских студија.

Један од примарних аспеката који се у литератури наглашава у контексту алгоритама као што су *Fast R-CNN*, *YOLO*, *U-Net*, *DeepLab*, *ResNet*, *MobileNet* и *EfficientDet*, јесте диференцијација у погледу приоритета које сваки од модела остварује. На пример, *YOLO* (You Only Look Once) модел се у литератури доследно позиционира као изузетно брз, али потенцијално компромитујући прецизност када се примењује на сложене сцене са високим нивоом шума или слабим контрастом, што је често случај са инфрацрвеним сигналима. Насупрот томе, *Fast R-CNN* је теоријски препознат као метод који пружа високу прецизност и робусност, али уз нешто мање изражену ефикасност у реалном времену.

У реалним условима експеримента, који је обухватио вишекритеријумску евалуацију кроз примену хибридног модела (SWARA + NWA), ове претпоставке су у значајној мери потврђене. *Fast R-CNN* је доследно остварио високе вредности у категоријама прецизности детекције и ефикасности сегментације, што је у директној корелацији са његовом архитектуром која укључује регресиону анализу

над регионима интереса (ROI) [102], као и имплементацију класичног CNN приступа за фино подешавање. Додатно, *Fast R-CNN* је био рангиран највише у укупној интегралној оцени, чиме се јасно потврђује његова комплементарна вредност у вишекритеријумском окружењу.

Алгоритам *MobileNet*, дизајниран за употребу у окружењима ограничених ресурса (edge уређаји, IoT платформе), испунио је теоријска очекивања у категорији енергетске ефикасности. Његова лака архитектура са дубинским сепарабилним конволуцијама утицала је на мању потрошњу енергије и нижу латенсију, што га чини идеалним за имплементацију у мобилним и уграђеним системима. Резлутати овог истраживања показују да је *MobileNet* постигао највишу оцену управо у критеријуму енергетске ефикасности, чиме је потврђено да се теоријски пројектована предност манифестује и у пракси.

Са друге стране, алгоритам *U-Net* је, као модел који се често користи у биомедицинској сегментацији [103], показао велику прецизност у очувању просторне резолуције. Његова архитектура у облику симетричне U-структуре са скиповима (skip connections) омогућава високу тачност у задацима где је потребно очување просторне резолуције, што је посебно важно у анализи инфрацрвених података где су објекти често малих димензија и слабог контраста. Резултати истраживања потврђују да је *U-Net* постигао највише вредности у овом критеријуму, доследно подржавајући почетне хипотезе.

YOLO, иако теоријски позициониран као један од најбржих алгоритама, није у свим сценаријима показао доминантну позицију у критеријуму брзине обраде. Уочено је да су неки други модели, попут *EfficientDet*, који користи оптимизовану BiFPN архитектуру и моделску компресију, остварили сличне или боље резултате у одређеним реалним условима. Ово указује на важност контекста примене, док је *YOLO* изузетно ефикасан у општим задацима, његова примена у специфичном инфрацрвеном домену, уз ограничене ресурсе и потенцијално различите услове осветљења и резолуције, може донети одступања у перформансама.

Резултати такође потврђују да *ResNet* и *DeepLab* одржавају високу робусност на шум, што је било у складу са очекивањима, нарочито због њихових дубоких архитектура и уграђених механизама нормализације и контроле преливања (residual connections). *DeepLab*, са својом способношћу мултискалне обраде, показао се као поуздан у условима смањене видљивости и нестандардне геометрије, што је критично у инфрацрвеној спектралној анализи [104].

Анализа показује да постоји висока степен усклађености између теоријских очекивања и практичних резултата добијених применом предложеног хибридног модела. То не само да потврђује ваљаност коришћених метода и процена, већ и пружа основ за њихову примену у другим областима. Добијени резултати говоре у прилог томе да је могуће на основу теоријских и архитектонских карактеристика алгоритама донети поуздане предикције о њиховим перформансама, али под условом да се у анализу укључе контекстуални фактори као што су тип података, системски захтеви и карактеристике окружења.

Поред тога, подударност резултата указује на ефикасност хибридног модела као алата који не само да обједињује различите критеријуме, већ их повезује у

функционалну целину која омогућава мултидимензионално тумачење ефикасности алгоритама. Употреба SWARA методе за процену значаја критеријума допринела је томе да финални резултати евалуације буду не само нумерички коректни, већ и суштински релевантни за практичну примену у реалном времену.

5.1 Тумачење добијених одступања и њихових узрока

Детаљна анализа резултата показала је да, иако је хибридни модел SWARA–NWA омогућио стабилно рангирање алгоритама, поједини показатељи одступају од очекиваних вредности добијених на основу теоријских претпоставки и резултата из литературе. Најизраженија одступања уочена су код критеријума енергетске ефикасности и робусности на шум, где је неколико алгоритама показало значајно различите резултате у односу на референтне студије. Таква одступања могу се тумачити кроз призму више међусобно повезаних фактора: техничке архитектуре модела, услова експеримента, избора скупа података, као и начина нормализације критеријума у поступку NWA агрегације.

Код *U-Net* и *DeepLab* алгоритама, који су у литератури препознати по изузетној способности сегментације сложених структура, у овом истраживању је уочено благо смањење прецизности у сценаријима са високим нивоом шума. Ова појава може се довести у везу са карактером обуке на ограниченом броју инфрацрвених узорака и релативно мањим капацитетом модела да се прилагоде варијацијама у интензитету и спектралној структури сигнала. С друге стране, Fast *R-CNN* је задржао стабилност и у таквим условима, што потврђује његову флексибилну архитектуру која боље одговара захтевима реалног времена, али и већу осетљивост на оптимизацију параметара током обуке.

Одступања у домену енергетске ефикасности показала су да су алгоритми попут *EfficientDet* и *MobileNet*, који су пројектовани за рад на уређајима са ограниченим ресурсима, у овом моделу остварили ниже вредности него што је очекивано. Разлог за то лежи у начину мерења и нормализације података: док су у референтним радовима енергетски захтеви анализирани на нивоу архитектонске комплексности (број параметара и FLOPs), у овом истраживању критеријум је обухватио и стварно време обраде и оперативни контекст употребе, што је прецизније одразило стварну потрошњу ресурса у динамичким условима. Управо оваква методолошка специфичност представља једну од кључних предности предложеног оквира, јер омогућава финију дискриминацију између номиналних и стварних перформанси.

Још један значајан извор одступања јавља се у оцени прецизности детекције код алгоритама *YOLO* и *FCN*. Иако су у претходним истраживањима ови модели бележили веома високе резултате у задацима детекције објеката у RGB спектру, њихова примена у инфрацрвеном домену захтева адаптацију хиперпараметара и поновну калибрацију слојева за фузију карактеристика. Без такве адаптације, што је у овом раду намерно избегнуто ради очувања униформних услова поређења, алгоритми су показали мање стабилне резултате, нарочито у случајевима ниског

контраста између циља и позадине. Та чињеница додатно потврђује да прецизност детекције није апсолутна мера квалитета модела, већ зависи од компатибилности архитектуре и физичких својстава анализираног сигнала.

Делимична одступања примећена су и у критеријуму ефикасности сегментације, где је *Binary Segmentation* показала изненађујуће стабилне резултате у односу на очекивања [105]. Ово указује на то да једноставнији модели, уколико су добро подешени за конкретан тип података, могу надмашити сложеније архитектуре у задацима са уским доменом примене. Тај налаз упућује на закључак да повећање архитектонске дубине не мора нужно довести до побољшања резултата, већ може проузроковати супротан ефекат у условима ограничених ресурса.

Коначно, анализом корелације између критеријума, утврђено је да висока прецизност није обавезно праћена високом енергетском ефикасношћу. То потврђује да међу критеријумима постоји одређена напетост која захтева приступ вишекритеријумске анализе, ради добијања уравнотежене и интерпретабилне процене.

5.2 Анализа предности и ограничења примењеног модела

Предложени хибридни модел који обједињује методе SWARA и NWA показао је више значајних предности у односу на стандардне приступе вишекритеријумском одлучивању, као и неколико ограничења која указују на могућности за његово даље унапређење. Највећа предност модела огледа се у способности да повеже субјективне експертске процене са објективним квантитативним показатељима. Таква синтеза омогућила је свеобухватну и прегледну евалуацију алгоритама, уз смањен утицај индивидуалних пристрасности. Истовремено, обезбеђена је поузданост резултата и њихова репродуктивност, што је нарочито важно у техничким системима високих захтева.

Флексибилност модела представља још једну важну предност. Пошто су SWARA и NWA методолошки независне од природе анализираних критеријума, предложени оквир се може прилагодити не само задацима детекције инфрацрвених сигнала, већ и ширем спектру техничких апликација у којима се доносе одлуке на основу више међусобно зависних параметара. У том контексту, модел показује висок степен скалабилности, могуће је додавати нове критеријуме, мењати структуру тежинских коефицијената или уводити додатне алгоритме без потребе за радикалним изменама методологије.

Друга значајна предност односи се на транспарентност поступка и могућност ревалоризације тежина критеријума. SWARA метод омогућава да се у свакој итерацији поступка донесе јасно образложена процена важности сваког критеријума, што повећава поузданост процеса одлучивања. Када се ове тежине затим интегришу у NWA анализу, добијени резултати постају лако интерпретабилни и проверљиви. То омогућава да се свака одлука у систему може накнадно објаснити и оправдати, што је посебно важно у контексту индустријских и безбедносних примена где су захтеви за одговорношћу и траговима одлука веома

изражени.

Посебна вредност модела огледа се у његовој репродуктивности и стабилности резултата. Захваљујући јасно дефинисаној процедури нормализације података и примени једнообразних критеријума за све алгоритме, постигнута је конзистентност у рангирању, чак и када се мењају улазни параметри или величина узорка. Ово својство потврђује примењивост модела у различитим сценаријима и повећава његову научну поузданост. Истовремено, модел омогућава и релативно једноставну интеграцију нових алгоритама у процес евалуације, што га чини дугорочно одрживим у истраживачком и индустријском контексту.

Међутим, упркос наведеним предностима, модел има и одређена ограничења. Најпре, SWARA метода, иако интуитивна, остаје делимично зависна од субјективних процена експерата. Уколико се број учесника у евалуацији смањи или профил стручњака није довољно разнолик, може доћи до пристрасности у дефинисању тежинских коефицијената. Иако NWA метод ублажава овај ефекат, не постоји механизам који би у потпуности уклонио субјективност. Због тога би увођење статистичке консолидације већег броја експертских мишљења или анализа екстремних вредности могло допринети већој поузданости модела.

Друго ограничење односи се на осетљивост модела на нормализацију података. С обзиром на то да се критеријуми мере различитим јединицама (нпр. fps, проценат тачности, количина потрошене енергије), и мала одступања у вредностима могу утицати на коначни ранг алгоритама. Због тога би било корисно увести стандардизоване метрике и референтне оквире за упоредну процену различитих алгоритама.

Даље, предложени модел у садашњем облику не укључује динамичко прилагођавање тежина у зависности од контекста примене, што би у неким ситуацијама могло довести до мање оптималног избора алгоритма. На пример, у системима где је критичан параметар време реакције, енергетска ефикасност може имати секундарни значај, док у еколошким системима управо енергетска оптимизација може бити пресудна. Стога би проширење модела у правцу контекстуалне или адаптивне евалуације представљало природан корак ка његовом унапређењу.

Ограничење се делимично јавља и у одсуству аутоматизоване компоненте за учење на подацима, односно у чињеници да се поступак доделе тежина и даље ослања на експертску процену. Увођење компоненти машинског учења могло би омогућити аутоматско ажурирање тежина на основу акумулираних резултата, што би повећало степен објективности и смањило потребу за ручним интервенцијама.

Иако ова ограничења указују на одређене слабости, она не умањују вредност предложеног оквира, већ пре представљају основу за његово даље развијање. Свеобухватност, транспарентност и методолошка доследност чине SWARA–NWA модел поузданим инструментом за научно засновано одлучивање у области детекције инфрацрвених сигнала и шире. У том смислу, ограничења се могу посматрати као подстицај за даље истраживање и проширење модела у правцу његове веће аутономије, адаптивности и примене у реалним оперативним окружењима.

5.3 Потенцијал модела за примену у другим технолошким доменима

Развијени хибридни модел заснован на интеграцији метода SWARA и NWA показује изузетан потенцијал за примену у различитим областима у којима се одлуке доносе на основу више критеријума различите природе, значаја и мерљивости. Његова примењивост произилази из универзалности методолошког приступа који омогућава једноставну адаптацију модела различитим типовима података, уз очување аналитичке вредности и прецизности.

Једна од области у којима је примена модела посебно перспективна јесте индустријска аутоматизација и роботика. У тим системима потребно је истовремено проценити више аспеката као што су брзина, стабилност, потрошња енергије, поузданост и трошкови интеграције. Хибридни SWARA–NWA модел може послужити као алат за избор оптималних алгоритама управљања, детекције објеката или енергетске регулације у роботским системима. Његова способност да обједини експертске процене са емпиријским показатељима посебно је вредна у ситуацијама када системи морају функционисати у реалном времену, под променљивим условима рада.

У домену саобраћајних и интелигентних транспортних система, модел се може користити за процену софтверских решења која управљају саобраћајем, аутономним возилима или системима видео-надзора. Комбинација субјективног знања стручњака за безбедност и објективних показатеља (време реакције, тачност препознавања, капацитет обраде података) омогућава оптимизацију избора софтверских решења која утичу на ефикасност и безбедност транспорта. Поред тога, могуће је увести контекстуалне критеријуме, као што су климатски услови, густина саобраћаја или тип инфраструктуре, који би додатно побољшали примењивост модела у урбаним и међуградским сценаријима.

Значајан потенцијал препознаје се и у области енергетских система, нарочито у процени и селекцији алгоритама за предикцију потрошње, управљање паметним мрежама и оптимизацију обновљивих извора енергије. У таквим окружењима, где постоји изражен компромис између поузданости и енергетске ефикасности, предложени модел може послужити као инструмент за систематско вредновање више конкурентних решења. Увођењем SWARA–NWA приступа у процесе доношења одлука омогућава се постизање оптималног баланса између техничких параметара и економских ограничења, што је од кључног значаја за развој одрживих енергетских политика и технологија.

Још једна област у којој модел показује изузетан потенцијал је медицинска дијагностика и биомедицински инжењеринг, посебно у избору алгоритама за анализу медицинских снимака, препознавање образаца и класификацију патолошких стања. Због велике разноврсности медицинских података и различитих приоритета (тачност, време обраде, интерпретабилност резултата, степен поузданости), потребан је метод који омогућава свеобухватну и проверљиву евалуацију. SWARA–NWA модел може омогућити лекарима и

истраживачима да донесу информисане одлуке о избору алгоритма који најбоље одговара специфичној дијагностичкој сврси, уз истовремено очување етичких стандарда и безбедности података.

Поред техничких дисциплина, овај модел има потенцијал примене и у економији и управљању, где се често доносе одлуке које укључују велики број квантитативних и квалитативних критеријума. У процесима као што су избор инвестиционих пројеката, процена ризика или вредновање добављача, SWARA–NWA модел може обезбедити структуриран и објективан приступ који смањује субјективност и повећава транспарентност управљачких одлука. Управо ова карактеристика, која се односи на могућност примене на нефизичке, друштвено-економске системе, показује да предложени модел има интердисциплинарни карактер и да може бити користан у широком спектру научних и практичних контекста.

Посебно треба истаћи да предложени модел може послужити као основа за развој аутоматизованих платформи за евалуацију и одлучивање, где би тежине критеријума и резултати били ажурирани у реалном времену на основу долазних података. Таква решења била би посебно корисна у динамичким системима као што су паметни градови, где број релевантних фактора расте из дана у дан, а потреба за брзим и прецизним одлукама постаје критична. У том контексту, SWARA–NWA оквир може представљати основу за интеграцију са методама машинског учења, омогућавајући развој самоподесивих система за интелигентно управљање подацима.

Када узмемо све у обзир, универзалност, транспарентност и методолошка једноставност предложеног модела чине га изузетно погодним за прилагођавање различитим технолошким и друштвеним областима. Његова структура омогућава не само процену постојећих алгоритама, већ и тестирање нових технолошких решења, што га позиционира као користан алат за истраживаче, инжењере и доносиоце одлука. Увођење SWARA–NWA модела у друге домене стога се може посматрати као корак ка широј примени вештачке интелигенције у служби друштвеног и технолошког напретка.

5.4 Критички осврт на примењивост резултата у пракси

Анализа добијених резултата показује да предложени хибридни модел SWARA–NWA, иако је методолошки доследан и теоријски добро утемељен, у реалним условима тражи одређену дозу флексибилности и прилагођавања специфичностима сваког система у којем се примењује. Његова употребљивост зависи од више фактора, као што су квалитет и поузданост улазних података, доступност експертског знања, врста система у којима се примењује и степен аутоматизације процеса евалуације. Све то намеће потребу да се резултати овог рада сагледају не само као научни допринос, већ и као практичан инструмент који има одређена ограничења, али и значајне потенцијале за реалну примену.

Једна од основних предности примене SWARA–NWA модела у

оперативним системима јесте могућност стандардизације поступка евалуације алгоритама. Његова транспарентна структура омогућава да се процес одлучивања лако документује и ревидира, што је од посебног значаја у областима у којима је неопходна усаглашеност са безбедносним и стандардизационим протоколима. Међутим, практична имплементација овог модела у индустријским условима захтева одређен степен методолошке дисциплине и експертске подршке. Примену SWARA методе прате изазови у вези са обезбеђивањем квалитетних и конзистентних процена од стране експерата, јер различити нивои стручности и искуства могу довести до неусклађености тежинских коефицијената. Стога је у пракси неопходно формирати интердисциплинарне тимове који укључују стручњаке из области машинског учења, обраде сигнала, као и специјалисте за конкретни домен примене (на пример, безбедносне системе, енергетику или индустријску производњу). Такав приступ обезбеђује већи степен поузданости резултата и смањује ризик од субјективних одступања.

Када је реч о примени у системима за детекцију инфрацрвених сигнала, резултати показују да модел омогућава објективно рангирање и рационалан избор алгоритама, што директно утиче на унапређење поузданости и ефикасности система. У пракси, то значи да се кроз SWARA–NWA приступ могу оптимизовати процеси у којима је потребно постићи равнотежу између брзине обраде, тачности и енергетске ефикасности. Таква оптимизација посебно је значајна у системима који раде у условима ограничених ресурса, као што су мобилне или уграђене платформе (embedded systems), где сваки процентуални добитак у ефикасности има непосредан утицај на укупне перформансе и трошкове. Иако модел нуди могућност примене у реалном времену, системи у којима се одлуке доносе великом брзином захтевају додатну оптиматизацију. То се пре свега односи на потребу за убрзањем процеса рачунања, али и на прелазак са ручног на аутоматизовани рад у појединим корацима анализе. Критички посматрано, модел у садашњој форми представља прелазни корак ка интелигентним системима одлучивања, који би у будућности могли користити адаптивне тежине и самообучавање на основу историјских резултата. Иако садашња верзија обезбеђује стабилност и предвидивост, она не поседује могућност континуираног унапређивања без интервенције корисника. То указује на потребу за интеграцијом елемената машинског учења у SWARA фазу, како би се тежине критеријума могле динамички прилагођавати на основу нових података и промена у оперативном окружењу.

С друге стране, модел показује изразиту практичну вредност у едукативном и истраживачком контексту. Његов јасан структурални оквир, заједно са могућношћу визуализације резултата, чини га приступачним и корисним за студенте, инжењере и научнике који се први пут сусрећу са сложеним поступцима вишекритеријумског одлучивања. Примењујући овај модел, корисници лакше увиђају утицај појединачних параметара на доношење одлука, развијају аналитички начин размишљања и усвајају проверене праксе инжењерске процене.

Сумирајући утиске из досадашње примене, може се закључити да резултати истраживања имају високу практичну вредност, под условом да се модел користи у оквиру својих методолошких претоставки. Он представља поуздан алат за

подршку одлучивању у системима који захтевају вишекритеријумску анализу, али не и њену потпуну замену. Примена модела у пракси треба да буде праћена континуираним праћењем резултата и повратним прилагођавањем параметара, како би се очувала његова релевантност у условима брзог технолошког развоја. Управо та способност да се комбинују научна ригорозност и практична флексибилност чини SWARA–NWA модел драгоценим инструментом за будући развој интелигентних технолошких система.

5.5 Предлози за будућа истраживања

Резултати спроведеног истраживања показују да предложени хибридни модел SWARA–NWA пружа поуздан оквир за вишекритеријумску анализу вештачке интелигенције у системима који раде у реалном времену. Његова структура осмишљена је тако да подстиче транспаретност процеса евалуације и омогућава прилагођавање различитим техничким захтевима. Ипак, као и аналитичка структура, и овај модел оставља простор за даље усавршавање и проширење, посебно у правцу повећања аутоматизације, адаптивности и интероперабилности у различитим технолошким и оперативним окружењима. Предлози за будућа истраживања заснивају се на идентификованим ограничењима, али и на потенцијалима који су се показали током примене модела у анализи алгоритама детекције инфрацрвених сигнала.

Први правац будућих истраживања односи се на интеграцију метода машинског учења у SWARA фазу процеса, са циљем да се тежине критеријума не одређују искључиво експертским путем, већ и аутоматски, на основу статистичких анализа, историјских података или адаптивних модела. Таква „самообучавајућа“ верзија SWARA методологије омогућила би динамичко ажурирање приоритета у зависности од услова примене и континуирано побољшавање резултата у складу са акумулираним искуством. На тај начин, модел би прешао из статичког у адаптивни систем одлучивања, што је предуслов за његову потпуну примену у интелигентним и аутономним системима.

Други смер будућег развоја односи се на увођење временске компоненте у процес евалуације. Тренутни SWARA–NWA модел полази од претпоставке да су критеријуми и резултати константни у оквиру једног циклуса анализе, што није увек реалистично у динамичким системима. Развој модификоване верзије модела која би укључивала фактор времена, омогућио би анализу промене перформанси алгоритама током њиховог дуготрајног рада и у различитим фазама експлоатације. Такав приступ би омогућио идентификацију деградације учинка, енергетске нестабилности или губитка тачности током континуираног рада, што је изузетно важно за примене у критичним инфраструктурама и надзорним системима.

Трећи предложени правац истраживања односи се на интеграцију модела у реалне индустријске и безбедносне системе, кроз развој софтверских алата и интерфејса који би омогућили директну примену ове методологије. Израда интерактивног софтверског оквира или веб платформе за евалуацију алгоритама у реалном времену омогућила би брже тестирање, визуализацију и прилагођавање

критеријума различитим потребама. Такав инструмент би допринео преносу знања из научног у индустријски домен и створио предуслове за стандардизацију процеса процене алгоритама у техничким системима.

Један од потенцијално највреднијих праваца за унапређење модела односи се на проширење скупа критеријума и алгоритама. Иако је ова студија обухватила пет најзначајнијих критеријума и девет репрезентативних алгоритама, могуће је у будућности укључити додатне факторе као што су скалабилност, интерпретабилност резултата, отпорност на сајбер-претње или трошкови имплементације. Увођењем ових параметара повећала би се универзалност модела и омогућила његова примена у сложенијим технолошким системима који интегришу више нивоа одлучивања.

Још једна значајна перспектива развоја огледа се у интеграцији модела са другим утврђеним вишекритеријумским методама, попут AHP, TOPSIS или VIKOR. Креирањем хибридних или хијерархијских система одлучивања омогућила би се комплементарна анализа истих скупова података из различитих методолошких углова. Овакво упоредно посматрање резултата допринело би дубљем разумевању стабилности модела, као и потврди његове поузданости у различитим сценаријима примене.

Истраживање би у наредној фази требало усмерити ка интердисциплинарној примени модела. Посебну релевантност имају области у којима се обрађују подаци великог обима и различите привреде, попут биомедицине, енергетике, саобраћаја и управљања градском инфраструктуром. Сви ови домени карактеришу комплексни системи са више улазних параметара и често супротстављеним циљевима, што представља идеалан терен за примену вишекритеријумских метода. Развијени оквир може у тим областима постати део већих интегрисаних платформи за оптимизацију, мониторинг и доношење одлука, чиме би се остварио његов пуни потенцијал.

Стога, даља истраживања треба усмерити ка унапређењу степена интелигентности, адаптивности и оперативне аутомности модела. На тај начин би се омогућило не само његово методолошко усавршавање, већ и практична зрелост овог концепта, што ће у перспективи омогућити његову трансформацију у стандардизовани алат за интелигентно одлучивање у различитим технолошким системима.

6. Закључак

Истраживање представљено у овој докторској дисертацији било је усмерено на развој, примену и верификацију хибридног модела за вишекритеријумску евалуацију алгоритама вештачке интелигенције у системима за детекцију инфрацрвених сигнала у реалном времену. Модел је заснован на интеграцији метода SWARA и NWA, а осмишљен је као одговор на потребу за транспарентним и поузданим механизмом упоредне анализе алгоритама дубоког учења који, упркос високом нивоу перформанси, поседују разноврсне техничке и енергетске карактеристике.

Хибридни модел развијен у овом истраживању повезује квалитативне експертске процене значаја критеријума са квантитативном анализом перформанси, чиме се успоставља интегрисани приступ који обједињује субјективне и објективне индикаторе у оквиру јединствене одлуке. На тај начин остварује се уравнотежен поступак одлучивања који обједињује субјективне увиде и објективне индикаторе у јединствени аналитички оквир.

Модел је успешно примењен на девет репрезентативних алгоритама дубоког учења који се користе у домену детекције инфрацрвених сигнала (*Binary Segmentation*, *Fast R-CNN*, *DeepLab*, *U-Net*, *YOLO*, *ResNet*, *FCN*, *EfficientDet* и *MobileNet*), а вредновање је извршено у односу на критеријуме брзине обраде, прецизности, сегментације, робусности на шум и енергетске ефикасности. Резултати спроведене анализе показали су да *Fast R-CNN* постиже највиши интегрални скор у оквиру примењеног модела, што потврђује његову оптималну равнотежу између тачности, брзине и стабилности у реалном времену. Алгоритми *U-Net* и *DeepLab* остварили су најбоље резултате у домену сегментације и прецизности, док су *EfficientDet* и *MobileNet* показали потенцијал у контексту енергетске ефикасности, али уз нешто мању робусност у условима повећаног шума. Анализа корелације између критеријума потврдила је да не постоји јединствен алгоритам који истовремено оптимизује све параметре, што наглашава значај вишекритеријумског приступа као неопходног инструмента за избалансирано доношење одлука у технолошким системима.

Применом хибридног модела доказано је да овај приступ обезбеђује виши ниво интерпретабилности и транспарентности у процесу евалуације. За разлику од традиционалних статистичких метода које третирају критеријуме као независне и једнако важне, овај модел омогућава да се тежине критеријума одреде на основу стручног знања, уз задржавање конзистентности и математичке контроле. Истовремено, NWA омогућава да се појединачни резултати интегришу у јединствен индекс, чиме се добија свеобухватна слика учинка сваког алгоритма. Овакав методолошки спој пружа нови оквир за процену алгоритама у условима реалног времена.

Дискусија резултата показала је да хибридни модел има изражене предности у односу на постојеће приступе, нарочито у погледу флексибилности,

репродуктивности и скалабилности. Он се може прилагодити различитим типовима података, сценаријима примене и бројевима критеријума без нарушавања интерне логике. Могућност ревалоризације тежина критеријума и проширивања скупа параметара чини га дугорочно одрживим инструментом за процену алгоритама не само у домену обраде инфрацрвених сигнала, већ и у другим областима као што су саобраћај, енергетика, индустријска аутоматизација и медицинска дијагностика. С друге стране, анализом су идентификована и одређена ограничења модела, која указују на потребу за даљим истраживањем и унапређењем. Прво, иако SWARA метода пружа јасан механизам за експертску процену, субјективни фактор не може бити у потпуности елиминисан. Друго, процес нормализације података има значајан утицај на резултате [106], што захтева развој стандардизованих протокола за прикупљање и обраду улазних података. Треће, модел у садашњој верзији функционише као статичан систем без могућности динамичког ажурирања тежина и критеријума у зависности од контекста. Ова ограничења, међутим, не умањују његову вредност, већ представљају потенцијалне смернице за будући развој у правцу повећања аутоматизације и адаптивности.

Систематично спроведено истраживање омогућило је прецизну и аргументовану процену свих постављених хипотеза. Прва хипотеза (X1) у потпуности је потврђена, будући да примена предложеног хибридног модела показује висок степен репродуктивности, смањен утицај субјективности у експертским оценама и конзистентно рангирање анализираних алгоритама. Друга хипотеза (X2) такође је потврђена, пошто је утврђено да јасно дефинисани критеријуми и адекватно одређене тежине доприносе усклађености са реалним техничким и оперативним захтевима различитих окружења.

Трећа хипотеза (X3) је делимично потврђена, али и методолошки проширена. Примена модела на реалним подацима резултирала је избором алгоритама који у већини случајева премашују перформансе класичних приступа. Међутим, уочене су варијације у резултатима у зависности од специфичности примене, што указује на значај контекстуалне анализе и потребу за флексибилним тумачењем исхода.

Четврта хипотеза (X4) је у значајној мери потврђена, с обзиром на то да модел унапређује процес интеграције алгоритама, скраћује време и смањује трошкове експерименталних поступака, те пружа значајну подршку организацијама које располажу ограниченим техничким и материјалним ресурсима.

На крају, пета хипотеза (X5) је у потпуности потврђена у оквиру домена обухваћеног овим истраживањем. Добијени резултати указују на то да предложени модел има потенцијал да постане општеприхваћена основа за селекцију алгоритама дубоког учења у различитим ИКТ системима, уз отворену могућност даљег развоја, прилагођавања и стандардизације у различитим контекстима примене.

Практични значај добијених резултата огледа се пре свега у чињеници да предложени модел омогућава стандардизацију процеса избора алгоритама у системима који раде у реалном времену. Његова примена може значајно смањити

трошкове експерименталног тестирања, убрзати процес имплементације алгоритама и унапредити укупну поузданост технолошког система. У индустријским, безбедносним и енергетским апликацијама, модел може служити као независан механизам за доношење одлука, заснован на објективним метрикама и контролисаним експертским проценама. Поред тога, предложени приступ има изразиту едукативну и истраживачку вредност, будући да студентима и истраживачима пружа структуриран начин разумевања процеса вишекритеријумског одлучивања у сложеним техничким системима.

Посебан научни допринос овог истраживања огледа се у интердисциплинарном карактеру предложеног модела. Повезивањем метода вишекритеријумског одлучивања са алгоритмима дубоког учења у домену обраде инфрацрвених сигнала, ова докторска дисертација отвара простор за развоју нове истраживачке парадигме која интегрише принципе рачунарске интелигенције, системског инжењерства и аналитике одлучивања. Такав приступ омогућава сагледавање технолошких процеса у целини, а не само кроз перформансе појединачних алгоритама, већ кроз њихову усклађеност са захтевима реалног окружења, ограничењима ресурса и циљевима система као целине.

У ширем научном контексту, добијени резултати потврђују да комбиновање више метода одлучивања може значајно доприноси побољшању квалитета евалуације у системима заснованим на вештачкој интелигенцији. Овакав приступ може послужити као основа за даљи развој комплекснијих хибридних модела који би укључивали и друге технике, као што су AHP, TOPSIS или VIKOR, чиме би се додатно ојачала валидност и отпорност процеса анализе.

Слика 9 илуструје могуће области примене хибридног SWARA-NWA модела у различитим технолошким системима, што указује на широку примењивост концепта и представља реалну перспективу за будућа интердисциплинарна истраживања.

Узимајући у обзир све наведене аспекте, може се закључити да предложени модел у потпуности остварује постављене циљеве истраживања. Он:

- пружа поуздан и струкуриран оквир за процену алгоритама вештачке интелигенције;
- интегрише субјективне и објективне показатеље у јединствену метрику;
- омогућава репродуктивности, флексибилност и адаптивност резултата, и
- показује високу примењивост у пракси, као и значајан потенцијал за даљи развој и унапређење.

На основу приказани{х резултата, ово истраживање показује да хибридни модел SWARA–NWA представља иновативан, функционалан и теоријски заснован приступ вишекритеријумском вредновању алгоритама вештачке интелигенције. Његова примена у анализи алгоритама за детекцију инфрацрвених сигнала у реалном времену потврдила је његову високу научну и практичну вредност, док његова флексибилност и скалабилност отварају додатни простор за примену у

ширем спектру технолошких области.

Ово истраживање не доприноси само методолошком развоју вишекритеријумских система, већ представља и смерницу за креирање нових

Слика бр: 9 Могуће области примене хибридног SWARA–NWA модела у технолошким системима

генерација адаптивних система који функционишу на објективним основама, уз могућност динамичке оптимизације на основу промена у техничким и оперативним условима. На тај начин, допринос ове докторске дисертације превазилази домен непосредне примене и постаје значајан ресурс за будућа истраживања у области системског инжењерства, рачунарске интелигенције и аналитике одлучивања.

7. Литература

[1] H. Bauer, M. Patel, and J. Veira, "The Internet of Things: Sizing up the opportunity," McKinsey, 2014. Available: http://www.mckinsey.com/insights/high_tech_telecoms_internet/the_internet_of_things_sizing_up_the_opportunity

[2] A. Karim and J. Y. Andersson, "Infrared detectors: Advances, challenges and new technologies," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 51, no. 1, 2013.

[3] M. Javaid, A. Haleem, R. Vaishya, R. Bahl, and H. Vaish, "Sensors for daily life: A review," Sensors International, vol. 2, p. 100121, 2021.

[4] F. Hou, X. Zhang, X. Wu, and L. Yang, "Review on infrared imaging technology," Sustainability, vol. 14, no. 18, p. 11161, 2022.

[5] A. Rogalski and K. Chrzanowski, "Infrared devices and techniques," in Handbook of Optoelectronics, CRC Press, 2017, pp. 633–686.

[6] S. Popovic, S. D. Popovic, N. Denic, D. Djukic, and J. Stojanovic, "Risk management innovations through neural network integration in automated boiler combustion systems," Journal of Soft Computing and Decision Analytics, vol. 3, no. 1, pp. 129–135, 2025.

[7] N. Gligorijević, S. Djukić Popović, V. Nikolić, D. Viduka, and S. Popović, "A hybrid SWARA-NWA framework for evaluating AI-based image recognition algorithms in educational technology applications," International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education, 2025.

[8] G. Alotaibi et al., "Artificial intelligence diagnostic tools: Utilizing a convolutional neural network to assess periodontal bone level radiographically," BMC Oral Health, vol. 22, no. 1, p. 399, 2022.

[9] J. Dong et al., "Advances in multi-sensor data fusion: Algorithms and applications," Sensors, vol. 9, no. 10, pp. 7771–7784, 2009.

[10] A. Mokari, S. Guo, and T. Bocklitz, "Exploring the steps of infrared spectral analysis: Pre-processing, data modelling, and deep learning," Molecules, vol. 28, no. 19, p. 6886, 2023.

[11] C. Corsi, "Infrared: A key technology for security systems," Advances in Optical Technologies, vol. 2012, p. 838752, 2012.

[12] O. Ghorbanzadeh et al., "Evaluation of different machine learning methods and deep-learning convolutional neural networks for landslide detection," Remote Sensing, vol. 11, no. 2, p. 196, 2019.

[13] J. Zhang et al., "LU-NET: An improved U-Net for ventricular segmentation," IEEE Access, vol. 7, pp. 92539–92546, 2019.

[14] N. Siddique, S. Paheding, C. P. Elkin, and V. Devabhaktuni, "U-net and its variants for medical image segmentation," IEEE Access, vol. 9, pp. 82031–82057, 2021.

[15] A. M. A. Abdulghani and G. G. M. Dalveren, “Moving object detection in video with YOLO and Faster R-CNN,” Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, no. 33, pp. 40–54, 2022.

[16] X. Xu, Y. Liu, Y. Yu et al., “Intelligent monitoring and diagnostics using deep learning and multi-sensor fusion,” Measurement, vol. 165, p. 108086, 2020.

[17] D. Manolakis and G. Shaw, “Detection algorithms for hyperspectral imaging applications,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 19, no. 1, pp. 29–43, 2002.

[18] R. A. A. Habeeb et al., “Real-time big data processing for anomaly detection,” International Journal of Information Management, vol. 45, pp. 289–307, 2019.

[19] S. K. Rogers et al., “Neural networks for automatic target recognition,” Neural Networks, vol. 8, nos. 7–8, pp. 1153–1184, 1995.

[20] N. Clinton et al., “Accuracy assessment measures for object-based image segmentation goodness,” Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 76, no. 3, pp. 289–299, 2010.

[21] S. Souffi et al., “Robustness to noise in the auditory system,” eNeuro, vol. 8, no. 2, 2021.

[22] N. V. Martyushev et al., “Energy efficiency of electrified ground transport,” Energies, vol. 16, no. 2, p. 729, 2023.

[23] I. M. Lavrukhina et al., “Interdisciplinary approach as the basis of scientific and technological policy,” European Proceedings of Social and Behavioural Sciences.

[24] M. Entezami et al., “AI-based criteria in development of digital economy,” Journal of Soft Computing and Decision Analytics, vol. 3, no. 1, pp. 72–95, 2025.

[25] S. Popović et al., “Optimization of artificial intelligence algorithm selection,” Electronics, vol. 14, no. 3, p. 562, 2025.

[26] D. Djukic, S. Djukić Popović, and M. Gligorijević, “Neural networks in pellet combustion control,” Proceedings of 9th Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy, 2023, pp. 249–254.

[27] E. Estévez and M. Marcos, “Model-based validation of industrial control systems,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 8, no. 2, pp. 302–310, 2011.

[28] M. M. Tepic and S. Popovic, “Implementation of AI and ML in smart water projects,” ALFATECH Conference, Belgrade, 2025.

[29] U. Cortès et al., “Artificial intelligence and environmental decision support systems,” Applied Intelligence, vol. 13, no. 1, pp. 77–91, 2000.

[30] J. Si et al., “Assessment of building-integrated green technologies,” Sustainable Cities and Society, vol. 27, pp. 106–115, 2016.

[31] U. Rude et al., “Research and education in computational science,” SIAM Review, vol. 60, no. 3, pp. 707–754, 2018.

[32] M. C. Roco and W. S. Bainbridge, “Discovery, innovation: Convergence of knowledge,” Journal of Nanoparticle Research, vol. 15, no. 9, p. 1946, 2013.

[33] M. Satyanarayanan, “Mobile computing: The next decade,” ACM SIGMOBILE, vol. 15, no. 2, pp. 2–10, 2011.

[34] M. Vujanović et al., “Sustainable energy-efficient technologies,” Applied Energy, vol. 283, p. 116280, 2021.

[35] K. Wildes and N. Lindgren, A Century of Electrical Engineering and Computer Science at MIT, MIT Press, 1985.

[36] C. Corsi, “Infrared: A key technology for security systems,” Advances in Optical Technologies, 2012.

[37] S. Mohseni et al., “Explainable AI systems,” ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems, vol. 11, nos. 3–4, pp. 1–45, 2021.

[38] I. H. Sarker, “Deep learning: Overview,” SN Computer Science, vol. 2, no. 6, pp. 1–20, 2021.

[39] M. Vollmer, “Physics of the electromagnetic spectrum,” Electromagnetic Technologies in Food Science, 2021.

[40] N. Denić et al., “Innovations in risk management,” Proceedings of 6th Virtual International Conference Path to a Knowledge Society, 2024.

[41] S. Djukic Popovic et al., “PPG signal analysis,” AIIT Conference, Bitola, 2023.

[42] M. Rahman et al., “Cross and multimodal biomedical image retrieval,” International Journal of Multimedia Information Retrieval, vol. 3, no. 3, pp. 131–146, 2014.

[43] A. Mitiche and J. K. Aggarwal, “Multiple sensor fusion,” Optical Engineering, vol. 25, no. 3, pp. 380–386, 1986.

[44] T. Goswami, “Impact of deep learning in image processing,” ICMEET, 2018.

[45] S. Indolia et al., “Understanding convolutional neural networks,” Procedia Computer Science, vol. 132, pp. 679–688, 2018.

[46] F. Mendoza and R. Lu, “Basics of image analysis,” Hyperspectral Imaging Technology, 2015.

[47] N. Scales et al., “Automated infrared image segmentation,” IEEE EMBC, 2004.

[48] H. Seo et al., “Machine learning techniques for biomedical image segmentation,” Medical Physics, vol. 47, no. 5, pp. e148–e167, 2020.

[49] Y. Guo et al., “Otsu multi-threshold segmentation,” Biomimetics, vol. 8, no. 5, p. 418, 2023.

[50] H. Wang and F. Miao, “Building extraction using deep residual U-Net,” European Journal of Remote Sensing, vol. 55, no. 1, pp. 71–85, 2022.

[51] Y. Yin et al., “Faster-YOLO,” Digital Signal Processing, vol. 102, p. 102756, 2020.

[52] C. Liu et al., “Object detection based on YOLO,” IEEE ITOEC, 2018.

[53] J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrell, “Fully convolutional networks,” CVPR, 2015.

[54] K. He et al., “Deep residual learning,” CVPR, 2016.

[55] L. Borawar and R. Kaur, “ResNet: Solving vanishing gradients,” ICRTC, 2023.

[56] L. Zhang et al., “Infrared-visible fusion using ResNet-152,” Multimedia Tools and Applications, vol. 81, no. 7, pp. 9277–9287, 2022.

[57] J. Jiaqi et al., “Underwater object detection,” Remote Sensing, vol. 14, no. 18, p. 4487, 2022.

[58] J. Ren et al., “Distributed object detection in edge computing,” IEEE Network, vol. 32, no. 6, pp. 137–143, 2018.

[59] Y. Liu et al., “Multi-scale DNN for spacecraft segmentation,” Sensors, vol. 22, no. 11, p. 4222, 2022.

[60] L. Chen et al., “DeepLab,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 40, no. 4, pp. 834–848, 2017.

[61] T. Bai et al., “Optimized railway fastener detection,” Measurement, vol. 182, p. 109742, 2021.

[62] S. Ren et al., “Faster R-CNN,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149, 2016.

[63] H. Yuan et al., “Low-res MobileNet,” Multimedia Tools and Applications, vol. 81, no. 27, pp. 38513–38530, 2022.

[64] M. Widiansyah et al., “Skin cancer segmentation with MobileNet–LinkNet,” Journal of Physics: Conference Series, vol. 1943, p. 012113, 2021.

[65] E. Zavadskas and Z. Turskis, “MCDM methods in economics,” Technological and Economic Development of Economy, vol. 17, no. 2, pp. 397–427, 2011.

[66] V. Keršuliene et al., “SWARA method,” Journal of Business Economics and Management, vol. 11, no. 2, pp. 243–258, 2010.

[67] C. L. Hwang and K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making. Springer, 1981.

[68] E. Triantaphyllou, Multi-Criteria Decision Making Methods. Springer, 2000.

[69] B. Roy, Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Springer, 1996.

[70] T. Saaty, The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, 1980.

[71] S. Greco et al., Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Springer, 2016.

[72] M. Čupić et al., Odlučivanje: formalni pristup, FON, 2003.

[73] N. Tihi et al., “Advanced Time Series Models for Urban Drought,” Preprints, 2025.

[74] S. H. Zolfani et al., “Extended SWARA,” Soft Computing, vol. 22, pp. 7399–7405, 2018.

[75] D. Stanujkic et al., “Packaging design selection using SWARA,” Engineering Economics, vol. 26, no. 2, pp. 181–187, 2015.

[76] A. Demirci, “SWARA–OCRA supplier selection,” Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi, vol. 13, no. 2, pp. 43–55, 2022.

[77] M. Alimardani et al., “Hybrid SWARA–VIKOR,” Technological and Economic Development of Economy, vol. 19, no. 3, pp. 533–548, 2013.

[78] S. Rehman et al., “Grey-SWARA for mortality risk assessment,” Journal of Healthcare Engineering, vol. 2021, p. 7302157, 2021.

[79] Y. Rong and L. Yu, “Offshore wind farm site selection,” Entropy, vol. 25, no. 7, p. 1081, 2023.

[80] M. Nikolić et al., “Maintenance strategy selection,” Tehnička dijagnostika, 2010.

[81] Ç. Karamaşa, “Ranking service quality using MCDM,” Journal of Process Management and New Technologies, vol. 9, nos. 3–4, pp. 1–12, 2021.

[82] C. Zangemeister, Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Zangemeister & Partner, 2014.

[83] M. Bakir et al., “Operational performance evaluation in airlines,” Romanian Journal of Economic Forecasting, vol. 23, no. 2, pp. 149–172, 2020.

[84] A. Özdağoğlu et al., “Copeland–MCDM for motorcycle selection,” Journal of Process Management and New Technologies, vol. 9, nos. 3–4, pp. 13–27, 2021.

[85] K. Lin et al., “Flash flood risk assessment,” Journal of Hydrology, vol. 584, p. 124696, 2020.

[86] P. Burggräf et al., “Performance assessment for AI-supported decision-making,” Procedia CIRP, vol. 93, pp. 891–896, 2020.

[87] A. Ulutaş et al., “Hybrid grey PIPRECIA–OCRA,” Mathematics, vol. 8, no. 10, p. 1698, 2020.

[88] Q. Liu et al., “Thermal infrared object tracking with CNN,” IEEE Signal Processing Letters, vol. 24, no. 11, pp. 1624–1628, 2017.

[89] S. Popović et al., “Artificial neural networks in boiler automation,” eNergetics Conference, 2025.

[90] J. Bruce and M. Veloso, “Vision-based pattern detection,” IEEE ICRA, vol. 1, pp. 1277–1282, 2003.

[91] V. Ziyadinov and M. Tereshonok, “Noise immunity in CNN image recognition,” Sensors, vol. 22, no. 3, p. 1241, 2022.

[92] K. Baynes et al., “Energy consumption of embedded RTOS,” IEEE Transactions on Computers, vol. 52, no. 11, pp. 1454–1469, 2003.

[93] N. S. Punn and S. Agarwal, “Modality-specific U-Net variants,” Artificial Intelligence Review, vol. 55, pp. 5845–5889, 2022.

[94] S. Bećirović et al., “Suitability of Delphi method,” Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research, vol. 57, no. 4, pp. 1232–1241, 2023.

[95] Z. Yusop et al., Weighting Methods and Their Effects on MCDM Outcomes. Springer, 2015.

[96] S. Malefaki et al., “Comparison of MCDM methods,” 2024.

[97] G. V. Vlăsceanu et al., “Image segmentation evaluation metrics,” BRAIN, vol. 15, no. 4, pp. 295–318, 2024.

[98] G. Batchuluun et al., “Thermal image reconstruction with deep learning,” IEEE Access, vol. 9, pp. 5951–5971, 2020.

[99] X. Liu et al., “Medical image segmentation with deep learning,” Sustainability, vol. 13, no. 3, p. 1224, 2021.

[100] V. Serdechnyi et al., “Machine learning for difficult object detection,” Radioelectronic and Computer Systems, vol. 2025, no. 2, pp. 64–77, 2025.

[101] W. Wu et al., “YOLOv5 for small target detection,” PLoS One, vol. 16, no. 10, 2021.

[102] W. Wu et al., “Face detection with Faster R-CNN,” IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 49, no. 11, pp. 4017–4028, 2018.

[103] G. Du et al., “Medical image segmentation based on U-Net,” Journal of Imaging Science & Technology, vol. 64, no. 2, 2020.

[104] M. Elmezain et al., “Underwater vision with deep learning,” IEEE Access, 2025.

[105] S. Kovács et al., “Seeded binary segmentation,” Biometrika, vol. 110, no. 1, pp. 249–256, 2023.

[106] K. Cabello-Solorzano et al., “Impact of normalization on ML accuracy,” Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, pp. 344–353, 2023.

8. Прилози

Ово поглавље представља завршну целину докторске дисертације, чија је сврха да пружи потпун, систематизован и транспарентан увид у све пратеће материјале који допуњују главни текст и доприносе научној утемељености истраживања. У овом делу обухваћени су допунски садржаји који олакшавају проверу налаза, боље разумевање аналитичког поступка и увид у визуелне представе примењене у оквиру истраживачког процеса.

Посебно место заузимају графикони, табеле и слике, који су хронолошки распоређени према редоследу у тексту и јасно илуструју структуру предложеног модела, однос између критеријума, динамику рангирања алгоритама и друге визуелне параметре значајне за интерпретацију резултата. Ови елементи омогућавају читаоцу да на прегледан и аналитички начин сагледа све фазе истраживања.

Поред визуелних прилога, у поглављу је укључена и биографија истраживача, као и библиографија, које пружају сажет, али садржајно релевантан увид у академски и професионални развој аутора у области вештачке интелигенције и техничких наука. Овај део служи као допуна академској валидности и контекстуализује истраживачки профил аутора. Уз то, део прилога чине и формалне академске изјве прописане од стране високошколских установа, којима се потврђује оригиналност истраживња, самосталност у изради дисертације и поштовање етичких и методолошких стандарда.

На тај начин, ово поглавље заокружује целовиту структуру рада и обезбеђује да сваки читалац има увид у све пратеће елементе који подржавају главни садржај дисертације.

8.1. Списак графика

Графиk 1. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Брзина обраде.....49

График 2: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима.....50

График 3. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Прецизност детекције51

График 4: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима.....52

График 5. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Ефикасност сегментације.....54

График 6: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима.....54

График 7. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Отпорност на шум. 56

График 8: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима.....57

График 9. Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Енергетска ефикасност. 59

График 10: Линијски дијаграм за упоређивање параметара по алгоритмима.....59
График 11: Линијски дијаграм финалне интегралне анализе 63
График 12: Анализа осетљивости модела (Извор: Истраживање аутора).....66

8.2. Списак табела

Табела бр. 1: Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Брзина обраде.....49
Табела бр. 2: Приказ алгоритама у складу са критеријумом - Прецизност детекције.....51
Табела бр. 3: Приказ алгоритама у складу са критеријумом –Ефикасност сегментације.....53
Табела бр. 4: Приказ алгоритама у складу са критеријумом –Отпорност на шум 56
Табела бр. 5: Приказ алгоритама у складу са критеријумом –Енергетска ефикасност 58
Табела бр. 6: Финална интегрална анализа алгоритама (SWARA × NWA) 62

8.3. Списак слика

Слика бр: 1 Дијаграм задатка истраживања 7
Слика бр: 2 Приказ хипотеза.....10
Слика бр: 3 Мрежа ко-јављања кључних речи (VOSviewer); величина чвора ~ учесталости, дебљина везе ~ јачини повезаности (total link strength). 32
Слика бр: 4 Графички приказ броја радова у којима се појављује макар једна од кључних речи дисертације.....33
Слика бр: 5 Приказ методологије библиографског истраживања.....34
Слика бр: 6 Приказ истраживачког модела 42
Слика бр: 7 Процес нормализације података у оквиру хибридног SWARA–NWA 46
Слика бр: 8 Графички приказ тежине критеријума добијене SWARA методом ...61
Слика бр: 9 Могуће области примене хибридног SWARA–NWA модела у технолошким системима.....80

8.4. Биографија аутора

Кандидат је рођен 16. јуна 1991. године у Параћину. Основно образовање стекао је у Јагодини, где је 2006. године завршио Основну школу „Милан Мијалковић“. Средње образовање наставља у Електротехничкој и грађевинској школи „Никола Тесла“ у Јагодини, смер радио и видео техника, коју успешно завршава 2010. године.

Високо образовање започео је на Електронском факултету Универзитета у Нишу, где 2014. године стиче звање Дипломираног инжењера електротехнике и рачунарства. Након завршених основних студија, школовање наставља на Криминалистичко-полицијској академији, где стиче звање Мастер информатичар.

Своју професионалну каријеру започиње 2015. године у компанији “NF INNOVA”, на позицији програмера, где ради на имплементацији mBanking решења за водеће банке у земљи и иностранству.

Од 2019. године регистрован је као предузетник, те поред ангажмана у матичној компанији, пружа IT услуге и другим пословним партнерима, међу којима се издваја Raiffeisen банка. Од 2023. године активно је ангажован као предавач на Факултету информационих технологија у Београду и Факултету за математику и рачунарство Алфа БК Универзитета, где учествује у наставном процесу из области програмирања и информационих технологија.

Професионални ангажман проширује у оквиру Министарства унутрашњих послова, где је од 2025. године запослен као саветник. Поред наведеног, активан је и у домену мобилног програмирања, где обавља послове у звању сениор програмера.

Кандидат се служи енглеским језиком, поседује возачку дозволу Б категорије, и има црни појас у каратеу. Наступао је за карате репрезентацију Републике Србије, што сведочи о његовој дисциплини, посвећености и способности тимског рада.

У области стручног и научног ангажовања, учествовао је на бројним домаћим и међународним конференцијама, аутор је више стручних и научних радова, као и члан неколико пројеката, радних група и тимова. Један је од носилаца и реализатора обука за Л1, Л2 и Л3 ниво лиценци у области монтаже, извођења и надзора над системима техничке заштите лица и објеката.

Ожењен је и поносан је отац двоје деце.

8.5. Библиографија аутора

Радови у часописима:

1. **Gligorijević N.**, Djukić Popović S., Nikolić V., Viduka D. & Popović S. (2025). A Hybrid SWARA-NWA Framework for Evaluating AI-Based Image Recognition Algorithms in Educational Technology Applications. International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education (IJCRSEE) - **M 22**
2. Nenad Stanojević, Đ. Šarčević, Stefan Panić, Petar Spalević, Nikola Gligorijević, Čedomir Vasić, (2025) PERFORMANCE EVALUATION OF HYBRID RF/FSO SYSTEMS USING NAKAGAMI-M AND GAMMA-RICIAN MODELS FOR ONE-HOP AND MULTI-HOP SCENARIOS, Engineering review, ISSN 1330-9587 - **M**

Зборници међународних научних скупова:

1. Čabrić, V., **Gligorijević, N.,** Strugarević, D. & Marjanović Ocokoljić, S., (2024). Application of artificial intelligence within the „safe city“ concept. Proceedings of International Scientific and Professional Conference “ALFATECH“ Smart Cities and modern technologies March 15th 2024, Belgrade, Serbia, 102–109. doi:10.5281/zenodo.12614592 - **M 33**
2. **Gligorijević, N.,** Strugarević, D., Čabrić, V. & Račić, M. (2025) Proceedings of International Scientific and Professional Conference “ALFATECH“ Smart Cities and modern technologies. Proceedings of International Scientific and Professional Conference “ALFATECH“ Smart Cities and modern technologies Februaru 28th 2025, Belgrade, Serbia, 143-147. doi:10.46793/ALFATECHproc25.143G – **M33**
3. Strugarevic, D., **Gligorijevic, N.,** Simic, G., & Jevremovic, A. Using Human-Computer Interaction Data for Continuous Authentication in High-stake Electronic Assessments. In BOOK OF ABSTRACTS (p. 43). – **M33**
4. Brkljač, M., Gligorijević, M. & Gligorijević, N. (2025). Methodological Approach to Educating Students in the Field of Marketing in the Age of Artificial Intelligence. In the Book of Proceedings of IRASA International Scientific Conference, science, education, technology and innovation, SETI VII October 2025, Belgrade, Serbia. In print. – **M33**

Ангажовање на стручним и научним скуповима:

1. International Scientific and Professional Conference “ALFATECH“Smart Cities and modern technologies 2025, Београд, Србија – члан програмског одбора
2. International Scientific and Professional Conference “ALFATECH“Smart Cities and modern technologies 2024, Београд, Србија - члан програмског одбора
3. Координатор поставке Квантна еволуција у оквиру Зоне иновација и идеја на 18. Међународном фестивалу науке у Београду

8.6. Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: ***Никола Глигоријевић***

Број досијеа : ***2022/5904***

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

ХИБРИДНИ МОДЕЛ ЗА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКУ ЕВАЛУАЦИЈУ АЛГОРИТАМА ЗА ДЕТЕКЦИЈУ ИНФРАЦРВЕНИХ СИГНАЛА У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУ

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација ни у целини ни у деловима није била предложена за стицање дипломе студијских програма других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица;

Потпис аутора

У Београду, _____

_____

8.7. Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: ***Никола Глигоријевић***

Број досијеа : ***2022/5904***

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

ХИБРИДНИ МОДЕЛ ЗА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКУ ЕВАЛУАЦИЈУ АЛГОРИТАМА ЗА ДЕТЕКЦИЈУ ИНФРАЦРВЕНИХ СИГНАЛА У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУ

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

У Београду, _____ Потпис аутора

_____

8.8. Изјаву о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку АЛФА БК Универзитета да у Дигитални репозиторијум Универзитета унесе моју докторску дисертацију под насловом: ***ХИБРИДНИ МОДЕЛ ЗА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКУ ЕВАЛУАЦИЈУ АЛГОРИТАМА ЗА ДЕТЕКЦИЈУ ИНФРАЦРВЕНИХ СИГНАЛА У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУ***, која је моје ауторско дело.

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

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

1. Ауторство (CC BY)
2. **Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)**
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, _____ Потпис аутора

_____

1. **Ауторство.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћењадела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.