



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА



**Аутоматизовано издвајање
хиперболичних рефлексива и обрада
података из радарграма формираних
применом георадара**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:
Проф. др Александар Ристић

Кандидат:
Жељко Бугариновић

Нови Сад, 2022 године

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Жељко Бугариновић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	Проф. др Александар Ристић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Аутоматизовано издвајање хиперболичних рефлексија и обрада података из радарграма формираних применом георадара
Језик публикације (писмо):	Српски (ћирилица)
Физички опис рада:	Унети број: Страница: 223 Поглавља: 9 Референци: 159 Табела: 27 Слика: 113 Графикона: 29 Прилога: 4
Научна област:	Геодетско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Геоинформатика
Кључне речи / предметна одредница:	Детекција објеката подземне инфраструктуре, <i>GPR</i> , машинско учење, <i>COD</i> , <i>CNN</i> , <i>R-CNN</i> , <i>fasterR-CNN</i> , <i>Canny</i> , <i>gprMax</i> , аутоматизована обрада радарграма, хиперболична рефлексија
Резиме на језику рада:	Докторска дисертација посвећена је области аутоматизоване обраде радарграма формираних применом георадара. Развијени су и имплементирани нови алгоритми за аутоматизовану детекцију и одређивање координата темна хиперболичних рефлексија као и издвајање координата тачака на њиховим крацима. Све анализе и верификације су извршене над реалним и синтетичким подацима.
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	11. јул 2019.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

<p>Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)</p>	<p>Председник: др Миро Говедарица, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан: др Биљана Аболмасов, редовни професор, Рударско-геолошки факултет, Београд</p> <p>Члан: др Александра Радуловић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан: др Душан Јовановић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p> <p>Члан, ментор: др Александар Ристић, редовни професор, Факултет техничких наука, Нови Сад</p>
<p>Напомена:</p>	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Željko Bugarinović
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Prof. Aleksandar Ristić, Ph.D., full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title:	Automated extraction of hyperbolic reflections and data processing from radargrams acquired by GPR scanning technology
Language of text (script):	Serbian language (cyrillic)
Physical description:	Number of: Pages: 223 Chapters: 9 References: 159 Tables: 27 Illustrations: 113 Graphs: 29 Appendices: 4
Scientific field:	Geodetic engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Geoinformatics
Subject, Key words:	Underground infrastructure detection, GPR, Machine Learning, COD, CNN, R-CNN, fasterR-CNN, Canny, gprMax, Automated GPR data processing, Hyperbolic reflections
Abstract in English language:	PhD thesis is dedicated to the field of automated processing of radargrams formed by the application of GPR. New algorithms for automated detection and determination of the coordinates of the apexes of hyperbolic reflections as well as the extraction of the coordinates of points on their prongs have been developed and implemented. All analyzes and verifications were performed on real and synthetic data.
Accepted on Scientific Board on:	July 11th, 2019.
Defended: (Filled by the faculty service)	

² The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

5Ā – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

<p>Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)</p>	<p>President: Miro Govedarica, Ph.D., full professor, Faculty of technical sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: Biljana Abolmasov, Ph.D., full professor, Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade</p> <p>Member: Aleksandra Radulović, Ph.D., associate professor, Faculty of technical sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: Dušan Jovanović, Ph.D., associate professor, Faculty of technical sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member, mentor: Aleksandar Ristić, Ph.D., full professor, Faculty of technical sciences, University of Novi Sad</p>
<p>Note:</p>	

Резиме

Аквизиција података о објектима подземне инфраструктуре има важну улогу у различитим анализама, које су применљиве у најширем спектру грана привреде. Технологија скенирања георадаром представља једну од водећих савремених метода за детекцију објеката и анализу подповршинског састава земљишта без ископавања. Основни проблем примене ове технологије огледа се у интерпретацији резултата скенирања, која може бити изузетно комплексна, при чему доношење исправних закључака првенствено зависи од искуства оператера. Такође, количина прикупљених података често превазилази могућности оператера да сагледа све параметре који утичу на доношење исправних одлука. Из наведених разлога јавља се све већа потреба за аутоматизованим или полуаутоматизованим процедурама обраде података прикупљених георадаром које имају за циљ да обезбеде лакше, брже и једноставније доношење исправних одлука у процесу интерпретације ових података.

Примарни циљ дисертације био је да се предложи алгоритам за аутоматизовану обраду радарграма који је независан од улазних параметара аквизиције. Секундарни циљ јесте да алгоритам обезбеди обраду веће количине улазних података у блиско реалном времену.

У оквиру ове докторске дисертације, а на основу извршене анализе постојећих метода, развијена су нова решења за аутоматизовану обраду резултата скенирања георадаром. За детекцију хиперболичних рефлексива развијена су два нова алгоритма *gprAPEX* и *gprCAPEX*, базирани на примени *Cascade Object Detector (COD)*, конволуционих неуронских мрежа (*CNN*) и *Canny* детектора ивица. Поред тога, развијени су иновативни приступи за издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексива и елиминацију интерферираних хиперболичних рефлексива који су интегрисани у постојеће алгоритме.

Валидација алгоритма извршена је над низом синтетичких и реалних података са различитим степеном сложености, утицаја шума и комплексности њиховог садржаја.

Кључне речи: Детекција објеката подземне инфраструктуре, *GPR*, машинско учење, *COD*, *CNN*, *R-CNN*, *fasterR-CNN*, *Canny*, *gprMax*, аутоматизована обрада радарграма, хиперболична рефлексива

Abstract

The acquisition of data on underground infrastructure facilities plays an important role in various analyses, which are applicable in the widest range of economic sectors. Ground Penetrating Radar is one of the leading modern methods for object detection and analysis of subsurface soil composition without excavation. The main problem with the application of this technology is reflected in the interpretation of the scan results, which can be extremely complex, whereby making the correct conclusions primarily depends on the operator's experience. Also, the amount of collected data often exceeds the operator's ability to see all the parameters that influence making the right decisions. For the reasons mentioned, there is a growing need for automated or semi-automated procedures for processing data collected by georadar, which aim to ensure easier, faster and the simpler making of correct decisions in the process of interpreting this data.

The primary goal of the dissertation was to propose an algorithm for automated radargram processing that is independent of input acquisition parameters. A secondary goal is for the algorithm to provide processing of a large amount of input data in near real-time.

As part of this doctoral dissertation, based on the analysis of existing methods, new solutions were developed for the automated processing of georadar scanning results. For the detection of hyperbolic reflections, two new algorithms gprAPEX and gprCAPEX were developed, based on the application of Cascade Object Detector (COD), convolutional neural networks (CNN) and Canny edge detector. In addition, innovative approaches for extracting coordinates of points on the prongs of hyperbolic reflections and eliminating interfering hyperbolic reflections have been developed and integrated into existing algorithms.

The validation of the algorithm was performed on a series of synthetic and real data with different degrees of complexity, the influence of noise and complexity of their content.

Keywords: *Underground infrastructure detection, GPR, Machine Learning, COD, CNN, R-CNN, fasterR-CNN, Canny, gprMax, Automated GPR data processing, Hyperbolic reflections*

Захвалница

Посебну захвалност дугујем ментору, проф. др Александру Ристићу, на свесрдној, стручној и несебичној помоћи током израде свих фаза ове докторске дисертације као и саветима и сугестијама које су значајно унапредиле овај рад.

Захваљујем се и председнику комисије за оцену и одбрану докторске дисертације, проф. др Миру Говедарици, као и свим члановима комисије, проф. др Биљани Аболмасов, проф. др Александри Радуловић и проф. др Душану Јовановићу, на корисним саветима и сугестијама, као и издвојеном времену за детаљан преглед докторске дисертације.

На крају, захвалност дугујем родитељима који су ми пружали подршку током целокупног периода студирања и стручног усавршавања, као и свим колегама, пријатељима и родбини. Неизмерну захвалност дугујем и својој супрузи на безрезервној подршци, саветима, и стрпљењу током целокупног периода израде докторске дисертације.

САДРЖАЈ

<i>Резиме</i>	<i>i</i>
<i>Abstract</i>	<i>ii</i>
<i>Захвалница</i>	<i>iii</i>
<i>Садржај</i>	<i>iv</i>
<i>Списак слика</i>	<i>ix</i>
<i>Списак табела</i>	<i>xiv</i>
<i>Списак графика</i>	<i>xvi</i>
<i>Списак скраћеница</i>	<i>xviii</i>
1. УВОД	1
1.1 Предмет научног истраживања	2
1.2 Циљ научног истраживања	2
1.3 Полазне хипотезе	3
1.4 Потреба за истраживањем	3
1.5 Значај и могућност примене резултата истраживања	4
1.6 Кратак преглед поглавља	5
2. Објекти подземне инфраструктуре	7
2.1 Цевоводи	8
2.1.1 Водовод.....	15
2.1.2 Канализација	16
2.1.3 Топловод	19
2.1.4 Гасовод.....	21
2.1.5 Нафтовод.....	22
2.1.6 Дренажни системи	23
2.2 Каблови	25
2.2.1 Електроенергетска мрежа	25
2.2.2 Телекомуникациона мрежа.....	27
2.3 Правила полагања подземних водова.....	30
2.3.1 Опште одредбе.....	30
2.3.2 Дубине полагања подземних водова.....	35
2.3.3 Просторни распоред подземних водова	37

2.3.4 Међусобно усаглашавање водова.....	40
2.4 Резиме поглавља.....	43
3. Геофизичке методе за детекцију ОПИ.....	44
3.1 Електромагнетне методе.....	44
3.1.1 Технологија скенирања георадаром.....	45
3.1.1.1 Функционалне целине.....	47
3.1.1.2 Принцип рада.....	53
3.1.1.3 Модови аквизиције.....	54
3.1.1.4 Технике скенирања.....	56
3.1.1.5 Формирање радарграма.....	57
3.1.1.6 Формирање хиперболичне рефлексije.....	58
3.1.1.7 Калибрација релативне дубине.....	58
3.1.1.8 Ефекти поларизације ЕМ таласа.....	61
3.2 Простирање ЕМ таласа кроз земљиште.....	62
3.2.1 Максвелове једначине.....	62
3.3 Резиме поглавља.....	64
4. Аутоматизовани поступци обраде радарграма.....	65
4.1 Начин обраде радарграма.....	65
4.2 Тренутно стање у научној области.....	66
4.3 Правци развоја алгоритма.....	69
4.4 Дигитална слика.....	70
4.5 <i>Computer Vision</i>	71
4.6 Детекција објеката на основу <i>Cascade Object Detector-a</i>	74
4.6.1 Детектор базиран на <i>Naar</i> моделу.....	76
4.6.2 Детектор базиран на <i>HOG</i> моделу.....	77
4.6.3 Детектор базиран на <i>LBP</i> моделу.....	80
4.6.4 Резиме.....	81
4.7 Вештачке неуронске мреже.....	82
4.7.1 Биолошки неурони.....	82
4.7.2 Од биолошких до вештачких неурона.....	83
4.7.3 Слојеви вештачке неуронске мреже.....	84

4.8 Конволуционе неуронске мреже	85
4.8.1 Улазни слој	86
4.8.2 Слој конволуције.....	86
4.8.3 Слој сажимања	86
4.8.4 Активациона функција	87
4.8.5 Потпуно повезан слој	88
4.8.6 Архитектура конволуционе неуронске мреже.....	88
4.8.7 Процес обуке конволуционе неуронске мреже.....	90
4.8.8 Детекција објеката конволуционом неуронском мрежом	91
4.8.8.1 <i>R-CNN</i> детектор	91
4.8.8.2 <i>Fast R-CNN</i> детектор	92
4.8.8.3 <i>Faster R-CNN</i> детектор.....	93
4.8.8.4 <i>YOLO</i> детектор	94
4.8.8.5 Резиме	95
4.9 Детекција ивица	96
4.9.1 <i>Laplacian</i> оператори	98
4.9.1.1 <i>Marr Hildreth</i>	98
4.9.2 Градијентни оператори	99
4.9.2.1 <i>Robert</i>	100
4.9.2.2 <i>Prewitt</i>	100
4.9.2.3 <i>Sobel</i>	100
4.9.2.4 <i>Canny</i>	101
4.9.3 Резиме.....	103
4.10 Резиме поглавља.....	106
5. Имплементација предложених алгоритама	107
5.1 Софтверско окружење	108
5.1.1 <i>MatLAB</i>	108
5.1.2 <i>gprMax</i>	111
5.1.2.1 Одређивање оптималне вредности дискретизације	114
5.2 Улазни подаци	116
5.2.1 Реални радарграми (<i>.dzt</i>)	116

5.2.2 Синтетички радарграми (.out)	119
5.2.3 Радарграми у растерском формату (.jpg).....	119
5.2.4 Организациона структура улазних података	120
5.2.5 Резиме.....	120
5.3 Детекција хиперболичних рефлексја на радарграму и одређивање координата темена.....	121
5.3.1 Алгоритам 1 – <i>gprAPEX</i>	121
5.3.1.1 ФАЗА 1: Зонска сегментација радарграма.....	123
5.3.1.1.1 <i>COD</i> алгоритам.....	123
5.3.1.1.2 <i>Faster R-CNN</i>	124
5.3.1.1.3 Креирање обука.....	125
5.3.1.1.4 Креирање синтетичких радарграма	127
5.3.1.2 ФАЗА 2: Елиминација дуплих СОИ.....	128
5.3.1.3 ФАЗА 3: Елиминација хомогених СОИ	129
5.3.1.4 ФАЗА 4: Проналазак приближних координата темена хиперболичних рефлексја	131
5.3.1.5 Резиме	135
5.3.2 Алгоритам 2 - <i>gprCAPEX</i>	136
5.3.2.1 ФАЗА 1: Тачкаста сегментација радарграма применом <i>Scanpy</i> детектора	138
5.3.2.2 ФАЗА 2: Основна редукција ивичних пиксела	139
5.3.2.3 ФАЗА 3: Елиминација хоризонталних слојева	145
5.3.2.4 ФАЗА 4: Елиминација опадајуће врсте	153
5.3.2.5 ФАЗА 5: Елиминација изолованих пиксела.....	160
5.3.2.6 ФАЗА 6: Груписање ивичних пиксела	161
5.3.2.7 Резиме	161
5.4 Издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексја	163
5.4.1 Основна претрага.....	163
5.4.2 Одређивање критеријума заустављања за издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексја	165

5.4.2.1	Анализа интензитета рефлектованог сигнала издвојених тачака на крацима хиперболичних рефлексија	165
5.4.2.1.1	Варирање фреквенције антене	168
5.4.2.1.2	Варирање домета	169
5.4.2.1.3	Варирање диелектричне константе околног земљишта ...	170
5.4.2.1.4	Варирање дубине објекта	171
5.4.2.1.5	Варирање радијуса објекта	172
5.4.2.1.6	Варирање материјала објекта	173
5.4.2.1.7	Резиме.....	174
5.4.2.2	Анализа непосредне околине издвојених тачака на крацима хиперболичне рефлексије	175
5.4.2.2.1	Теоријски обрис хиперболичне рефлексије	175
5.4.2.2.2	Провера постојаности ивичних пиксела на горњем и доњем рубу хиперболичне рефлексије.....	176
5.4.2.2.3	Анализа резидуала тачака на крацима хиперболичних рефлексија у односу на криву другог реда	178
5.4.2.3	Резиме	181
5.5	Елиминација интерферираних хиперболичних рефлексија	183
6.	Резултати и дискусија	185
6.1	Аутоматизовано препознавање хиперболичних рефлексија	187
6.1.1	Зонска сегментација радарграма – <i>gprAPEX</i> алгоритам	197
6.1.2	Тачкаста сегментација радарграма – <i>gprCAPEX</i> алгоритам	199
6.2	Издавање тачака на крацима хиперболичних рефлексија	200
7.	Закључна разматрања	204
7.1	Правци будућих истраживања.....	206
8.	Литература	207
9.	Прилози	220
	Прилог 1. - Заглавље <i>.HD</i> фајла	220
	Прилог 2. Заглавље <i>.rad</i> фајла	221
	Прилог 3. Део функције за учитавање података из заглавља <i>.dzt</i> фајла.	222
	Прилог 4. Структура <i>.out</i> фајла.....	223

Списак слика

Слика 2.1 Челичне цеви (лево), бешавне (десно).....	10
Слика 2.2 Азбестноцементне цеви.....	11
Слика 2.3 Бетонске цеви	12
Слика 2.4 ПВЦ цеви различитих пречника	13
Слика 2.5 Полиетиленске цеви	13
Слика 2.6 Саставни делови водоводне мреже	16
Слика 2.7 Општи систем канализације	17
Слика 2.8 Скица сепарационог система канализације	17
Слика 2.9 Систем канализације у зависности од конфигурације терена и положаја реципијента	18
Слика 2.10 Пример топловода у земљаном рову (лево) и бетонском каналу (десно) 20	
Слика 2.11 Различити облици компензатора (топловодних лира)	20
Слика 2.12 Скица одушне луле	21
Слика 2.13 Попречни профил дренажног канала првог (а), другог (б) и трећег реда (ц)	24
Слика 2.14 Шематски приказ преносне и дистрибутивне електроенерг. мреже	25
Слика 2.15 Врсте електроенергетских каблова	27
Слика 2.16 Примери оптичких каблова.....	27
Слика 2.17 Структура оптичког кабла (а) и простирање светлости кроз језгро (б) ...	28
Слика 2.18 Скица подземне гасоводне цеви са траком за упозорење (лево) и одговарајуће надземне ознаке (десно).....	31
Слика 2.19 Укрштање гасовода са путем (а) и пругом (б, ц).....	32
Слика 2.20 Попречни пресек рова са гасоводном или нафтоводном цеви	33
Слика 2.21 Полагање електроенергетских каблова са тракама за упозорење	34
Слика 2.22 Профили ровова за постављање телекомуникационих каблова	34
Слика 2.23 Подела пешачке стазе на зоне [24]	37
Слика 2.24 Диспозиција објеката (2) – Улица ширине 27m	38

Слика 2.25 Диспозиција објеката (1) – Улица ширине 17m	38
Слика 2.26 Пример водова смештених у подземни колектор	39
Слика 2.27 Попречни пресек колектора за смештај подземних водова.....	39
Слика 3.1 Принцип простирања електромагнетних таласа	44
Слика 3.2 Спектар електромагнетних таласа	45
Слика 3.3 Георадар (а) и општи изглед резултата аквизиције (б)	46
Слика 3.4 Управљачка јединица, модел “SIR3000”.....	47
Слика 3.5 Принцип аналогно дигиталне (А/Д) конверзије	48
Слика 3.6 Линеарна диполна антена (а), линеарна хорн (б) и спирална антена (ц) 49	
Слика 3.7 Антене централних фреквенција 900MHz (а), 400MHz (б) и 200MHz (ц) . 49	
Слика 3.8 Детектабилност и домет у зависности од фреквенције антене	50
Слика 3.9 Импулсни GPR систем са два режима кретања (<i>push, pull</i>)	51
Слика 3.10 Изглед инкременталног енкодера.....	52
Слика 3.11 Примери емитованих импулса у временском домену са генератора импулса и предајног дела антене [35].....	53
Слика 3.12 Ефекат одбијања (ц) и преламања ЕМ таласа (б)	53
Слика 3.13 Методе аквизиције георадаром	54
Слика 3.14 Технике скенирања георадаром.....	56
Слика 3.15 Шематски приказ сцене и радарграма за случај два слоја земљишта (а) и једног објекта кружног попречног пресека са уједначеном вредношћу E_r (б)	57
Слика 3.16 Формирање композитног облика хиперболичне рефлексije (<i>A-scan</i>) и радарграма (<i>B-scan</i>)	57
Слика 3.17 Формирање идеалне хиперболичне рефлексije на радарграму	58
Слика 3.18 Пример када је сигнал у фази (а) и када је фазно померен за 180 степени (б).....	61
Слика 3.19 Изглед радарграма за неколико различитих водова: метални вод (а), празна ПВЦ цев (б), пуна ПВЦ цев (ц)	62
Слика 4.1 <i>A-scan</i> у временском и фреквенцијском домену	66
Слика 4.2 Развој техника у поступку анализе радарграма од 2000 године до данас [55].....	67

Слика 4.3 Квантизација вредности пиксела	71
Слика 4.4 Основне категорије препознавања објеката на сликама/видеу	73
Слика 4.5 Сегменти у оквиру <i>Cascade Object Detector-a (COD)</i>	74
Слика 4.6 Позитивни узорци за обуку.....	74
Слика 4.7 Негативни узорци за обуку.....	75
Слика 4.8 Фазе у оквиру <i>trainCascadeObjectDetector-a</i>	75
Слика 4.9 Различити скупови пиксела код <i>Haar</i> модела	77
Слика 4.10 Формирање интегралне слике	77
Слика 4.11 Хистограм (лево) за приказани радарграм (десно)	78
Слика 4.12 Дескриптори хистограма оријентисаних градијената	78
Слика 4.13 Хистограм оријентисаних градијената на делу радарграма.....	79
Слика 4.14 Принцип формирања бинарног и децималног броја у <i>LBP</i> моделу.....	80
Слика 4.15 Биолошки неурон	83
Слика 4.16 Чвор вештачке неуронске мреже са три улаза и једним излазом	84
Слика 4.17 Слојевита структура вештачке неуронске мреже.....	84
Слика 4.18 Основне компоненте конволуционе неуронске мреже (поједностављен модел)	85
Слика 4.19 Слој конволуције у архитектури <i>CNN</i>	86
Слика 4.20 Слој сажимања у архитектури <i>CNN</i>	87
Слика 4.21 Активациона <i>ReLU</i> функција.....	87
Слика 4.22 Потпуно повезан слој у архитектури <i>CNN</i>	88
Слика 4.23 Различите архитектуре конволуционих неуронских мрежа	88
Слика 4.24 Разлика између стандардног и резидуалног блока неуронске мреже	89
Слика 4.25 Архитектура <i>ResNet-50</i> мреже.....	90
Слика 4.26 <i>Workflow</i> за обуку и њену примену над тест подацима	91
Слика 4.27 Шематски приказ <i>R-CNN</i> модела [104].....	92
Слика 4.28 Шематски приказ <i>Fast R-CNN</i> модела.....	93
Слика 4.29 Шематски приказ <i>Faster R-CNN</i> модела [104], [108]	93

Слика 4.30 Шематски приказ рада <i>YOLO</i> алгоритма	94
Слика 4.31 Време обуке и време процесирања код <i>R-CNN</i> , <i>Fast R-CNN</i> и <i>Faster R-CNN</i> модела [105]	95
Слика 4.32 Графички приказ набла оператора.....	97
Слика 4.33 Различити типови оператора за детекцију ивица.....	98
Слика 4.34 а) <i>Gaussian</i> функција ($\sigma = 4$, $n = 25$), б) <i>Laplacian</i> функција ($\sigma = 4$, $n = 31$) [133]	99
Слика 5.1 Оригинална слика (а), пример маске за примену морфолошке операције (б) и резултујућа слика (ц).....	110
Слика 5.2 Дискретизација времена и простора за симулацију код <i>gprMax</i> -а.....	111
Слика 5.3 Пример једноставног <i>.in</i> фајла.....	113
Слика 5.4 Организациона структура улазних података	120
Слика 5.5 Блок дијаграм <i>gprAPEX</i> алгоритма (Алгоритам 1).....	122
Слика 5.6 Селекција позитивних узорака користећи сегменте од интереса.....	123
Слика 5.7 Пример селекције позитивних узорака обуке	124
Слика 5.8 Изглед сценарија за генерисање синтетичких радарграма	127
Слика 5.9 Координатне разлике два СОИ са различитим димензијама оквира	129
Слика 5.10 Издвојени сегмент од интереса (СОИ).....	131
Слика 5.11 Претрага локалних максимума на десну страну код субматрице димензија 3×2	132
Слика 5.12 Проналазак колоне темена хиперболичне рефлексije.....	134
Слика 5.13 Блок дијаграм <i>gprCAPEX</i> алгоритма (Алгоритам 2)	137
Слика 5.14 Резултат примене <i>Canny</i> детектора ивица над целокупним радарграмом	138
Слика 5.15 Основне групе ивичних пиксела у радарграму	139
Слика 5.16 Анализирани облици маске за претрагу непосредне околине ивичних пиксела.....	140
Слика 5.17 Ивични пиксели настали од приближно хоризонталних слојева у радарграму	145
Слика 5.18 Исечак радарграма са ивичним пикселом у непосредној околини темена хиперболичне рефлексije (лево) и вредностима интензитета рефлектованог сигнала (десно).....	154

Слика 5.19 Ивични пиксели на доњем и горњем рубу хиперболичне рефлексije..	154
Слика 5.20 Пример претраге локалних максимума за почетне ивичне пикселе са доњег и горњег руба у непосредној околини темена хиперболичне рефлексije.....	155
Слика 5.21 Пример претраге локалних максимума на леву и десну страну за почетне пикселе на крацима хиперболичне рефлексije.....	156
Слика 5.22 Зона претраге за изоловане пикселе.....	160
Слика 5.23 Групе пиксела са три (а) и пет ивичних пиксела (б) и пиксели који их репрезентују (ц, д, црвени пиксели).....	161
Слика 5.24 Резултат груписања ивичних пиксела.....	161
Слика 5.25 Зоне и начин претраге левог и десног крака хиперболичне рефлексije	164
Слика 5.26 Шема усвајања локалних максимума у поступку претрге координата тачака на крацима хиперболичних рефлексija	164
Слика 5.27 Теоријски обрис хиперболичне рефлексije (ц)	175
Слика 5.28 Кључне зоне које нарушавају симетрију ивичних пиксела у односу на тачке генерисане на крацима хиперболичне рефлексije	176
Слика 5.29 Изглед конкавне и конвексне криве	178
Слика 5.30 Тачке на крацима хиперболичних рефлексija за које се врши провера квадрата резидуала (црвени пиксели).....	179
Слика 5.31 Финални сет издвојених координата тачака на крацима хиперболичних рефлексija, укључујући и полином другог реда који их апроксимира	180
Слика 5.32 Пример интерфериране хиперболичне рефлексije над реалним и синтетичким радарграмом	183
Слика 5.33 Блок дијаграм за елиминацију интерферираних хиперболичних рефлексija насталих као последица конструктивне интерференције.....	184

Списак табела

Табела 2.1 Стандардни пречници цеви, дебљина зида и изолације изражени у [mm]	9
Табела 2.2 Минималне дубине укопавања водова	35
Табела 2.3 Основне карактеристике цевовода	35
Табела 2.4 Основне карактеристике каблова електроенергетске и ТТ мреже	36
Табела 2.5 Минимална хоризонтална растојања водова од стамбених објеката	39
Табела 2.6 Минимални хоризонтални размаци између паралелних водова	40
Табела 2.7 Предности и мане детекције ОПИ откопавањем у поређењу са неинвазивном детекцијом	42
Табела 3.1 Карактеристике антена различитих централних фреквенција [33]	51
Табела 3.2 Типичне вредности диелектричне константе	59
Табела 4.1 Подешавање параметара у процесу обуке <i>COD</i> -а	76
Табела 4.2 Аналогија између људског мозга и вештачке неуронске мреже	83
Табела 5.1 Основне целине алгоритма за препознавања објеката од интереса	108
Табела 5.2 Уграђене функције у оквиру <i>Image Processing Toolbox</i> -а	109
Табела 5.3 Теоријска растојања између пријемног и предајног дела <i>GPR</i> антена ..	112
Табела 5.4 Оптималне вредности дискретизације за синтетичке радарграме у зависности од централне фреквенције антене	115
Табела 5.5 Структура и број узорака у креираним обукама	125
Табела 5.6 Време потребно за креирање детектора	126
Табела 5.7 Резултат примене предложених маски над два репрезентативна примера	141
Табела 5.8 Тест подаци за препознавање хоризонталних слојева у радарграму	147
Табела 5.9 Резултати препознавања хоризонталних слојева у радарграму	148
Табела 5.10 Анализирани параметри за одређивање оптималних вредности броја итерација претраге локалних максимума и броја врста са опадајућим индексом ..	156
Табела 5.11 Аквизициони параметри за анализу интензитета рефлект. сигнала ..	166
Табела 5.12 Граничне вредности у оквиру којих се врши провера постојања ивичних пиксела	177

Табела 6.1 Задаци и коришћене методе за њихову реализацију	185
Табела 6.2 Опште карактеристике репрезентативних примера	186
Табела 6.3 Просечна вероватноћа детекције хиперболичних рефлексија на рапрезентативним тест примерима.....	196
Табела 6.4 Финални сет издвојених координата тачака на једном краку детектоване хиперболичне рефлексије.....	202

Списак графика

График 4.1 Просечни утицај шума за различите детекторе ивица [150]	104
График 4.2 Просечно време процесирања за различите детекторе ивица [150].....	105
График 4.3 Тачност детекције ивичних пиксела за различите детекторе [150]	105
График 5.1 Вредност дискретизације у зависности од диелектричне константе за антену централне фреквенције $200MHz$	114
График 5.2 Вредност дискретизације у зависности од диелектричне константе за антену централне фреквенције $400MHz$	115
График 5.3 Вредност дискретизације у зависности од диелектричне константе за антену централне фреквенције $900MHz$	115
График 5.4 Анализа степена контраста	130
График 5.5 Процент сегментације радарграма применом <i>Canny</i> детектора ивица	138
График 5.6 Процент елиминације ивичних пиксела применом различитих маски	143
График 5.7 Време процесирања за примену различитих маски	144
График 5.8 Елиминација ивичних пиксела у радарграму са 25% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$	149
График 5.9 Елиминација ивичних пиксела у радарграму са 50% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$	149
График 5.10 Елиминација ивичних пиксела у радарграму са 75% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$	150
График 5.11 Елиминација ивичних пиксела у радарграму са 100% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$	150
График 5.12 Време процесирања за 25% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$	151
График 5.13 Време процесирања за 50% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$	151
График 5.14 Време процесирања за 75% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$	152
График 5.15 Време процесирања за 100% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$	152

График 5.16 Процент елиминације ивичних пиксела на леву страну, са опадајућим индексом једне врсте, за различит број итерација локалних максимума (5 - 20)....	157
График 5.17 Процент елиминације ивичних пиксела на леву страну, са опадајућим индексом од две врсте, за различит број итерација локалних максимума (5 - 20) ..	157
График 5.18 Процент елиминације ивичних пиксела на леву страну, са опадајућим индексом од три врсте, за различит број итерација локалних максимума (5 - 20) ..	158
График 5.19 Време процесирања ивичних пиксела на десну страну, са опадајућим индексом једне врсте, за различит број итерација локалних максимума (5 - 20)....	159
График 5.20 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању фреквенције антене од 300-1200MHz.....	168
График 5.21 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању домета скенирања у опсегу од 10-28ns...	169
График 5.22 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању диелектричне константе околног земљишта у опсегу од 4-20 (ϵ_r).....	170
График 5.23 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању дубине објекта у опсегу од 0.3-1m дубине.....	171
График 5.24 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању радијуса објекта од интереса у опсегу од ДН20-ДН200	172
График 5.25 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању материјала објекта у опсегу од 4-20 (ϵ_r)	173

Списак скраћеница

<i>GPR</i>	<i>Ground Penetrating Radar</i>
ДОПИ	Детекција објеката подземне инфраструктуре
ГИС	Геоинформациони систем
ОПИ	Објекти подземне инфраструктуре
<i>NDT</i>	<i>Non-Invasive Detection</i>
ДН	Унутрашњи пречник цеви
ДЕ	Спољашњи пречник цеви
<i>PEHD</i>	<i>High-density polyethylene</i>
ППР	Полипропилен
ПВЦ	Поливинил хлорид
ПЕ	Полиетилен
ГРП	Полиестер
АБ	Азбестбетон
ПБ	Полибутилен
ЕМ	Електромагнетни
<i>CSAMT</i>	<i>Controlled Source AudioMagnetoTellurics</i>
<i>TDEM</i>	<i>Time Domain EM Sounding</i>
ГПС	Глобални систем за позиционирање
<i>VLf</i>	<i>Very Low Frequency</i>
<i>GNSS</i>	<i>Global Navigation Satellite System</i>
А/Д	Аналого/дигитална
<i>ANN</i>	<i>Artificial Neural Networks</i>

<i>SVM</i>	<i>Support-vector machine</i>
<i>CNN</i>	<i>Convolution Neural Network</i>
<i>ML</i>	<i>Machine Learning</i>
<i>SAP</i>	<i>Sub-Array Processing</i>
<i>COD</i>	<i>Cascade Object Detector</i>
<i>CV</i>	<i>Computer Vision</i>
<i>AR</i>	<i>Augmented Reality</i>
<i>VR</i>	<i>Virtual Reality</i>
<i>HOG</i>	<i>Histograms of Oriented Gradient</i>
<i>LBP</i>	<i>Local Binary Pattern</i>
<i>ReLU</i>	<i>Rectified Linear Unit</i>
<i>ResNet</i>	<i>Residual neural network</i>
<i>R-CNN</i>	<i>Region-based Convolutional Neural Networks</i>
<i>YOLO</i>	<i>You Only Look Once</i>
<i>NMS</i>	<i>Non-Maximum Suppression</i>
<i>LoG</i>	<i>Laplacian of Gaussian</i>
<i>COИ</i>	Сегмент од интереса

1. УВОД

Прикупљање података на основу којих се дефинише положај, дубина и оријентација објеката подземне инфраструктуре има значајну улогу при пројектовању, прорачуну, моделовању и управљању сложеним инфраструктурним системима. Стога је добро структурирана и имплементирана база података о објектима подземне инфраструктуре у савремено организованим насељима и градовима која прате *SmartCity* концепте неопходна за квалитетно функционисање система за дистрибуцију енергије (топлотне, струјне), воде за пиће као и поуздан одвод отпадних вода путем канализационе мреже. Сваки застој у дистрибуцији или оштећењу неког од објеката подземне инфраструктуре може у већој мери негативно да утиче на стандардне услове за живот корисника или начини већу материјалну штету како у саобраћајној инфраструктури тако и у фабричким постројењима. Недовољна ажурност постојећих подлога о подземним водовима узрокује проблем детекције и отклањања квара на мрежи која може да траје значајно дужи од очекиваног. Такође, недостатак квалитетних информација о стварном стању постојеће подземне инфраструктуре има негативан утицај на економичност и ефикасност функционисања ових система. На основу свега наведеног, јасно се уочава потреба за брзом и тачном локализацијом постојећих водова применом неке од савремених метода неинвазивне детекције. Прикупљање података и евидентирање информација о водовима регулишу следећи закони и правилници [1]–[3]:

- *Закон о државном премеру и катастру* (Сл. гласник РС, бр. 72/09, 18/10, 65/13, 15/15 - одлука УС, 96/15, 47/17 – аутентично тумачење, 113/17 – др. закон, 27/18 – др. закон, 41/18 – др. закон и 9/20 – др. закон),
- *Закон о државном премеру и катастру и уписима права на непокретностима* (Сл. гласник РС, бр. 83/92, 52/93, 67/93, 48/94, 12/96 и 15/96 – испр.),
- *Правилник о премеру и катастру водова* (Сл. гласник РС, бр. 7/20).

Упис и евиденција утврђених података о водовима врши се у катастру водова, по катастарским општинама на основу података добијених снимањем водова.

Детекција објеката подземне инфраструктуре (ДОПИ) представља поступак идентификације, геореференцирања и утврђивања стварног стања постојећих водова без ископавања. Добијени подаци представљају важан извор информација за евиденцију и ажурирање података у катастру водова. Увид у распоред, тип и просторни положај подземних водова важан је приликом планирања, пројектовања и извођења грађевинских радова. Ажурни подаци из катастра водова обезбеђују брзо и тачно проналажење прекида вода, једноставније одржавање као и заштиту од оштећења која се на овај начин свде на минимум. Геореференцирање података о водовима обезбеђује њихов

прецизан положај, уклапање са другим водовима. Визуализација ових података врши се у различитим ГИС алатима а у новије време и на различитим геопорталима, који се најчешће развијају по општинама.

1.1 Предмет научног истраживања

Дефинисање предмета научног истраживања ове докторске дисертације проистиче из анализе актуелног стања у области савремене аквизиције података о објектима подземне инфраструктуре (ОПИ). За разлику од конвенционалног начина израде дводимензионалних геодетских и топографских подлога интензиван развој технологија аквизиције велике количине података и развој геоинформационих технологија омогућио је израду 3Д геодетских подлога. За ефикасне начине аквизиције просторних података у дигиталном облику најзначајнију улогу има брз развој технологија даљинске детекције, док интензиван развој геоинформационих технологија омогућава адекватно складиштење, обраду и коришћење овакве врсте података. Поред ажурних и квалитетних геодетских подлога из домена катастра непокретности за реализацију савремених пројеката битну улогу имају и подлоге о објектима подземне инфраструктуре. Важни задаци у грађевинарству који су проучавани у последњих неколико година огледају се у идентификацији каблова, цеви, канала и других ОПИ закопаних у земљиште или уграђених у зидове, као и локализација армираних елемената у бетону [4], [5]. У зависности од области примене и локалне јединице која је задужена за евиденцију о ОПИ, информације о ОПИ су често непотпуне, неажурне или уопште не постоје. Из наведених разлога јавља се честа потреба за анализом подручја од интереса у циљу детекције постојећих подповршинских објеката. Стога, значајну улогу са становишта прикупљања квалитетних података за прорачун, моделовање и управљање сложеним подземним инфраструктурним системима имају технологије детекције просторног положаја и карактеристика ОПИ без ископавања (*Non-Invasive Detection - NDT*).

1.2 Циљ научног истраживања

Циљ научног истраживања ове докторске дисертације је развој алгорита за аутоматизован поступак обраде података добијених применом технологије скенирања георадаром, који су представљени у форми радарграма. Истраживање подразумева изучавање, преглед и анализу постојећих решења, те развој и предлог нове методе за аутоматизовану обраду

радарграма. Положаји детектованих ОПИ у радарграму дефинисани су присуством хиперболичних рефлексја. Основни задаци алгоритма подразумевају обраду радарграма у блиско реалном времену и аутоматизовану екстракцију скупа информација од интереса. Информације од интереса чине тачну локализацију ДОПИ изражену кроз одређивање координата темена хиперболичних рефлексја, те низа парова координата које припадају крацима хиперболичних рефлексја и представљају улазне податке за одређивање геометријских карактеристика ОПИ са кружним попречним пресеком.

1.3 Полазне хипотезе

Општа хипотеза:

Предложени поступак омогућава аутоматизовану екстракцију информација о локацији и геометрији карактеристичних ОПИ применом технологије скенирања георадаром.

Посебна хипотеза:

Поступак треба да обезбеди брзу обраду веће количине података уз коректну интерпретацију резултата независно од:

- централне фреквенције антене која је коришћена у поступку аквизиције,
- типа медијума у којем се налазе карактеристични ОПИ (различити типови и хомогеност земљишта, као и запремински удео влаге) и
- утицаја конструктивне интерференције објеката у окружењу током аквизиције.

Општа хипотеза биће доказана кроз верификацију посебне хипотезе, тј. кроз разматрање и сагледавање различитог степена сложености и зашумљености улазних података (хиперболичних рефлексја).

1.4 Потреба за истраживањем

Упркос чињеници да су законитости формирања резултата скенирања георадаром истражене и познате, аутоматизоване процедуре обраде добијених резултата скенирања су и даље у развоју. Један од најважнијих задатака код интерпретације резултата добијених поступком скенирања подземних водова георадаром јесте њихова исправна локализација. Тачна локализација омогућена је на основу карактеристичног облика рефлексје у добијеном резултату скенирања. Поред локализације, важна је и категоризација ОПИ (кабел, цев), материјал објекта (матал, неметал), као и геометрија детектованих водова (дубина, положај и величина). Ови задаци могу да се

реализују поступком мануелне интерпретације резултата скенирања, као и развојем и применом полуаутоматизованих или аутоматизованих процедура обраде. У погледу знања и вештина оператера, мануелна идентификација и класификација хиперболичних рефлексја у реалним радарграмима представља сложен задатак. Због свега наведеног неопходни су брзи и ефикасни алгоритми обраде радарграма [6]–[10]. Развојем аутоматизованих процедура убрзава се процес интерпретације радарграма и омогућује екстракција квалитетног сета информација које визуелном анализом није могуће тачно одредити. Повећана количина података током аквизиције георадаром, комплексна интерпретација резултата скенирања, као и недостатак јединственог решења њихове аутоматизоване обраде, представљају предуслов за развој аутоматизованих процедура у циљу детекције и интерпретације карактеристичних аномалија у скенираним подацима [11], [12].

1.5 Значај и могућност примене резултата истраживања

Поступци аутоматизоване обраде података поред убрзаног процеса обраде велике количине података имају и неколико других карактеристика у зависности од области примене. Могућност примене резултата аутоматизоване обраде радарграма, њихов значај и допринос огледа се у следећем:

1. Мање субјективан поступак обраде велике количине радарграма,
2. Лакша идентификација ОПИ у поступку детекције,
3. Побољшање у односу на постојеће алгоритме:
 - а) Брже време процесирања,
 - б) Детаљније издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексја, значајних са становишта локализације и одређивања геометрије детектованих објеката,
 - ц) Мања осетљивост на шуме настале током аквизиције.
4. Одређивање геометријских карактеристика:
 - а) Просторног положаја и дубине детектованих објекта која је у складу са захтеваном тачношћу прописаном правилником о премеру и катастру водова, дефинисаном од стране Републичког Геодетског Завода [3].
 - б) Радијуса детектованог вода.
5. Добијање сета података за одређивање материјала вода.
6. Брже и једноставније доношење одлука оператера у поступку детекције објеката подземне инфраструктуре технологијом скенирања георадаром.

1.6 Кратак преглед поглавља

Прво поглавље поред уводних разматрања и предмета научног истраживања обухвата циљ научног истраживања као и полазне хипотезе дисертације. Објашњена је потреба, значај, допринос и могућности примене резултата истраживања.

Друго поглавље обухвата детаљну класификацију објеката подземне инфраструктуре објашњену кроз две основне поделе: цевоводи и каблови. За цевоводе су детаљно разматрани материјал и пречници цеви, као и начин преноса радног флуида од извора до потрошача. Анализирана су правила полагања подземних водова, где је посебно разматрана дубина и просторни распоред подземних водова, као и међусобно усаглашавање водова.

У трећем поглављу приказан је преглед геофизичких метода за неинвазивну детекцију објеката подземне инфраструктуре са акцентом на електромагнетне методе. Детаљно је објашњена технологија скенирања објеката подземне инфраструктуре георадаром. Поред хардверских целина, анализиран је принцип рада, модови аквизиције, технике скенирања и објашњен начин формирања резултата скенирања георадаром. На крају су приказани начини калибрације релативне дубине георадара и ефекти поларизације ЕМ таласа.

Четврто поглавље односи се на претходна истраживања, приказује постојеће начине за обраду радарграма и анализира тренутно стање у научној области аутоматизованих поступака обраде радарграма. Наведени су правци развоја алгорита у оквиру дисертације и анализирани алгоритми и алати који ће се применити из области обраде дигиталне слике: *Computer Vision* и алгоритми за детекцију ивица. У области *Computer Vision* детаљно се обрађује *Cascade Object Detector (COD)* и конволуционе неуронске мреже (*CNN*), док се у области детекције ивица анализирају *Laplacian* и градијентни оператори са акцентом на *Canny* оператор. На основу спроведених анализа донети су закључци о моделима *COD*-а, *CNN*-а, и оператору детекције ивица који су најпогоднији за примену у поступку аутоматизоване обраде радарграма.

Пето поглавље обухвата развој и имплементацију два нова решења: *gprAPEX* [12]–[14], *gprCAPEX* алгоритама [15] за аутоматизовану обраду радарграма, укључујући детекцију и издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексција. У првом делу описана су софтверска окружења и дат је детаљан опис улазних података за имплементацију предложених алгоритама, укључујући аквизицију реалних и поступак генерисања синтетичких радарграма. Имплементирани су одговарајуће функције за учитавање улазних података у сировом (*.dzt*), синтетичком (*.out*) и сликовном формату (нпр.: *.jpg*). Креиране су 42 обуке применом *COD* и *CNN* алгоритама, на основу 850 узоркованих реалних и 3334 генерисана,

синтетичка радаргама, које се примењују у првој фази *gprAPEX* алгоритма. Затим су описане преостале фазе *gprAPEX* алгоритма као и све фазе *gprCAPEX* алгоритма, базираног на тачкастој сегментацији радарграма. У наставку поглавља предложено је ново решење за издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексја. Анализиран је интензитет рефлектованог сигнала, теоријски обрис хиперболичне рефлексје и резидуали у циљу одређивања критеријума заустављања за издвајање тачака на крацима. Поглавље завршава анализом интерферираних хиперболичних рефлексја и њиховом елиминацијом.

У шестом поглављу приказани су добијени резултати применом предложених алгоритма. Валидација је извршена над различитим степенима сложености тестних података укључујући реалне и синтетичке податке. Поглавље наставља анализом и дискусијом резултата која је подељена у три дела. Први део укључује дискусију која се односи на резултате добијене применом *gprAPEX* алгоритма, док други део обухвата анализу добијених резултата на основу *gprCAPEX* алгоритма. Завршни, трећи део обухвата кључна запажања предложеног алгоритма за издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексја и алгоритма за елиминацију интерферираних хиперболичних рефлексја.

Седмо поглавље садржи закључна разматрања проистекла на основу добијених резултата и спроведених анализа. На крају овог поглавља наводе се правци будућих истраживања.

Осмо поглавље садржи списак одговарајуће литературе која је коришћена током израде и писања докторске дисертације.

Завршно, девето поглавље обухвата прилоге који се првенствено односе на изглед заглавља и структуре улазних података у различитим форматима њиховог записа.

2. Објекти подземне инфраструктуре

Многобројни природни и вештачки изграђени објекти различитих димензија, диспозиције и намене смештени су у подповршинске слојеве земљишта. У оквиру ове дисертације у фокусу су подземни водови (цевоводи и каблови) који се сврставају у групу изграђених објеката подземне инфраструктуре.

Према Закону о државном премеру и катастру и уписима права на непокретностима [1] у подземне водове убрајају се:

- а) Цевоводи
 - Водовод,
 - Канализација,
 - Топловод,
 - Гасовод,
 - Нафтовод и
 - Дренажни системи.
- б) Каблови
 - Електроенергетски и
 - Телекомуникациони.
- ц) Индустијски и други водови са припадајућим уређајима и постројењима и слично.

Под подземним објектима подразумевају се грађевине изграђене испод површине земље, као што су [16]:

- а) Сабирни тунели са подземним водовима,
- б) Резервоари, танкови,
- ц) Гараже, подземни објекти специјалне намене,
- д) Пешачки пролази,
- е) Склоништа,
- ф) Метрои,
- г) Подруми.

Информације о водовима и подземним објектима представљају саставни део сваког урбанистичког плана [16], стога су ажурне и тачне информације о овим објектима од изузетне важности.

Поред изграђених објеката постоје и природне хетерогености у земљишту настале под утицајем различитих ендогених и егзогених утицаја, и то:

- а) Шупљине испуњене ваздухом - ваздушни џепови мањих димензија,
- б) Пећине и веће шупљине испуњене ваздухом,
- с) Стена или већи комади чврстих природних материјала у околном растреситом земљишту.

У наставку рада детаљније ће бити објашњени подземни цевоводи и кабловски водови, јер су они примарни објекти од интереса у оквиру ове дисертације.

2.1 Цевоводи

Цевоводи (водови) су објекти који служе за затворени транспорт радног флуида, као што су: питка и отпадна вода, гас и слично [17]. Цев се састоји од основног (најчешће цилиндричног) дела и крајева који служе за спајање са другим цевима или елементима постројења. Основни цилиндрични део је дефинисан са називним (унутрашњим) пречником ДН (енг. *Diameter Nominal*) и дебљином зида, односно спољним пречником ДЕ (енг. *Diameter Outer*) на равном и Д (енг. *Diameter*) на проширеном крају цеви. Називни пречник је најчешће целобројна вредност унутрашњег пречника израженог у милиметрима или инчима (цолима - *col*). Ознака ДН се исписује на цевима како би се знало да се ради о унутрашњем пречнику цеви, нпр.:

$$\text{ДН } 200 \cdot 5.6 \quad (2.1)$$

Где је:

$$\begin{aligned} \text{ДН} &\cong 200\text{mm} \text{ (заокружена вредност унутрашњег пречника)} \text{ и} \\ \delta &= 5.6\text{mm} \text{ (дебљина зида)} \end{aligned}$$

или у цоловним ознакама:

$$\text{R } 2'' \cdot 3.6 \quad (2.2)$$

Где је:

$$\begin{aligned} \text{ДН} &\cong 2\text{col} \text{ и} \\ \delta &= 3.6\text{mm} \end{aligned}$$

Треба нагласити да се у појединим случајевима код цеви чије се димензије изражавају у цолима за називни пречник приказује спољни пречник цеви. У Табели 2.1 приказани су стандардни називни пречници, спољни и унутрашњи пречници као и најмања називна дебљина зида за два типа цеви (челична и пластична *PolyEthylene High-Density - PEHD* цев). Ова табела обухвата најчешће пречнике цеви који се користе у пракси. Поред наведеног у последњој колони налазе се и вредности дебљине изолације за сваки од наведених пречника цеви. Све приказане вредности изражене су у милиметрима.

У оквиру дисертације коришћени су називни пречници ДН, осим ако то није другачије наглашено у тексту или на сликама.

Табела 2.1 Стандардни пречници цеви, дебљина зида и изолације изражени у [mm]

ЧЕЛИЧНА ЦЕВ				РЕНД ЦЕВ			ИЗОЛАЦИЈА
Називни пречник ДН [mm]	Спољни пречник Ø [mm]	Најмања називна дебљина зида [mm]	Унутрашњи пречник Ø [mm]	Спољни пречник Ø [mm]	Дебљина зида [mm]	Унутрашњи пречник [mm]	Дебљина изолације [mm]
20	26.9	2.0	22.9	90	3.0	84.0	28.6
25	33.7	2.3	29.1	90	3.0	84.0	25.2
32	42.4	2.6	37.2	110	3.0	104.0	30.8
40	48.3	2.6	43.1	110	3.0	104.0	27.9
50	60.3	2.9	54.5	125	3.0	119.0	29.4
65	76.1	2.9	70.3	140	3.0	134.0	29.0
80	88.9	3.2	82.5	160	3.0	154.0	32.6
100	108.0	3.6	100.8	200	3.2	193.6	42.8
100	114.3	3.6	107.1	200	3.2	193.6	39.7
125	133	4.0	125.0	225	3.4	218.2	42.6
150	159	4.5	150.0	250	3.6	242.8	41.9
150	168.3	4.5	159.3	250	3.6	242.8	37.25
200	219.1	4.5	210.1	315	4.1	306.8	43.9
250	273.0	5.0	263.0	400	4.8	390.4	58.7
300	323.9	5.6	312.7	450	5.2	439.6	57.9
350	355.6	5.6	344.4	500	5.6	488.8	66.6
400	406.4	6.3	393.8	560	6.0	548.0	70.8
(450)	457.2	6.3	444.6	630	6.6	616.8	79.8
500	508.0	6.3	495.4	630	6.6	616.8	54.4
550	558.8	6.3	546.2	710	7.2	695.6	68.4
600	609.6	7.1	595.4	800	7.9	784.2	87.4
700	711.2	8.0	695.2	900	8.7	882.6	85.7
800	812.8	8.8	795.2	1000	9.4	981.2	84.2
900	914.4	10.0	894.4	1100	10.2	1079.6	82.6
1000	1016.0	10.0	996.0	1200	11.2	1177.6	80.8

Напомена:

Вредности у заградама треба да се избегавају

Поред наведене класификације по називним пречницима, постоји још неколико критеријума по којима се могу разврстати цевоводи, од којих су најважније следеће класификације [17]:

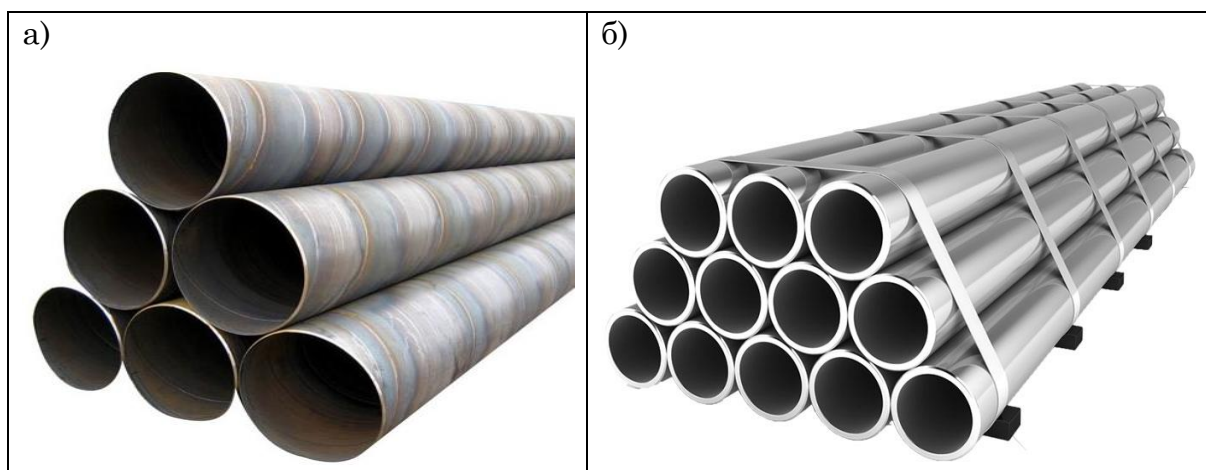
- у односу на ниво околног земљишта,
- у односу на материјал од кога су изграђени,
- по намени,
- у односу на проток радног флуида,
- у односу на начин вођења радног флуида од извора до потрошача,
- у односу на начин спајања елемената цевовода,

- у односу на температуру зида цевовода,
- у односу на температуру замрзавања (мржњења) земљишта у коме се цевоводи налазе и
- у односу на вођење цевовода (једни у односу на друге).

У односу на ниво околног земљишта цевоводи могу да буду: надземни, подземни и комбиновани. Надземни цевоводи се постављају изнад површине и најчешће се користе у изградњи пумпних станица. Надземни цевоводи су физички доступни па је њихово одржавање једноставније и економичније. Овакав начин постављања цевовода оправдан је у мочварним пределима, изван насељеног места, као и код цевног развода унутар фабричких кругова. У насељеним местима надземни цевоводи сметају саобраћајним комуникацијама, тако да су у тим зонама цевоводи готово увек подземни.

У односу на материјал, цеви могу бити израђене од металних и неметалних материјала. Металне цеви се израђују од челика, ливеног гвожђа, бакра, алуминијума, олова, месинга итд., док се неметалне цеви израђују од полипропилена (ППР, кућна водоводна инсталација), поливинилхлорида (ПВЦ, канализационе цеви), полиетилена (ПЕ, "окитен", разводни водовод), полиестера (ГРП, "фиберглас", старији типови водовода, велики пречници), азбест-цемента (старији типови водовода), бетона (канализациони колектори, дренажни и системи за наводњавање), гуме (обичне, импрегниране) и слично. У наставку рада детаљније ће бити објашњене особине, предности и мане неких од најчешће коришћених материјала цевовода у пракси.

Челичне цеви. У зависности од пречника челичне цеви се производе на два начина: шавне (већи пречници, Слика 2.1а) или бешавне (мањи пречници, Слика 2.1б). Уобичајено се производе у опсегу пречника од ДН40 до ДН1800.



Слика 2.1 Челичне шавне³ цеви (а), бешавне⁴ (б)

³ <https://yellshops.com/proizvod/celicne-savne-cevi/>, [датум приступа: 12.07.2019.]

⁴ <http://cevi.co.rs/celicne-besavne-cevi.html>, [датум приступа: 24.08.2019.]

Одржавање ових цеви је релативно једноставно при чему најчешћи проблеми настају на местима промене правца (коленима) због чега се она додатно ојачавају. Основни недостатак у примени челичних цеви је осетљивост на корозију због чега треба обезбедити унутрашњу и спољашњу заштиту цеви.

Цеви од ливеног гвожђа. Производе се од сировог лива и обострано се заштићују од корозије битуменским премазима. Различитих су тежина, техничких особина и обраде. Најчешће се користе за горње вертикалне канале и за доњи хоризонтални развод у зградама [18]. Уобичајени пречници ових цеви су: ДН80, ДН100, ДН125 и ДН150 са дужином цеви од 5m.

Азбестноцементне цеви (Слика 2.2). Азбестнобетонске (АБ) цеви су круте неметалне цеви које се производе мешавином азбестних влакана, песка и цемента.



Слика 2.2 Азбестноцементне цеви⁵

Канцерогени утицај азбестних влакана током дистрибуције воде овим цевима детаљно је проучаван у последњих неколико деценија. Истраживања су показала да није опасно пити воду дистрибуирану овим цевима, али може бити штетно када се ова влакна удишу. Ипак, у многим земљама ове цеви су због предострожности избачене из употребе.

Бетонске цеви (Слика 2.3). Основне предности ових цеви огледају се у следећем:

- минималан ризик од померања цеви,
- носе велике терете без оштећења или деформација,
- показују добру отпорност на корозију,
- нема посебне мере предострожности,
- мала унутрашња храпавост обезбеђује добре хидрауличне особине за пренос велике количине воде,
- релативно јефтине у великом пречнику.

⁵ <http://www.dzenarika.net/azbestne-vodovodne-cevi-ne-uticu-na-kvalitet-vode/>, [датум приступа: 25.07.2019.]

Основни недостаци бетонских цеви су:

- Ове цеви су круте и тешке,
- Полагање и одржавање обично захтева више времена и укључује тешке машине.



Слика 2.3 Бетонске цеви⁶

Пластичне цеви су цеви које се израђују од синтетичких материјала. Основне врсте материјала које се користе за израду пластичних цеви су: поливинил хлорид (ПВЦ), полиетилен (ПЕ), полиестер (ГРП), полипропилен (ППР) и полибутилен (ПБ). У пракси се најчешће користе ПВЦ и ПЕ, који ће детаљније бити објашњени у наставку дисертације.

ПВЦ цеви (поливинил хлорид), (Слика 2.4). Предност ПВЦ цеви по којима се оне истичу у односу на друге материјале цевовода су:

- нема корозије, а тиме се остварује и велика постојаност,
- добре хидрауличке особине, због глатке унутрашњости зидова цеви,
- мала маса, што олакшава транспорт и уградњу,
- отпорност на мраз, што омогућава уградњу и код температура испод 0°C,
- мали коефицијент топлотне проводљивости, што омогућује постављање цеви на мању дубину,
- могућност рециклирања материјала,
- једноставна монтажа, обрада и спајање.

Основни недостаци ових цеви су:

- крутост цеви при ниским температурама,
- неотпорност на високе температуре, услед чега се смањује чврстоћа, долази до истезања или запаљења.

Најчешће се производе у опсегу називног пречника ДН20 до ДН500.

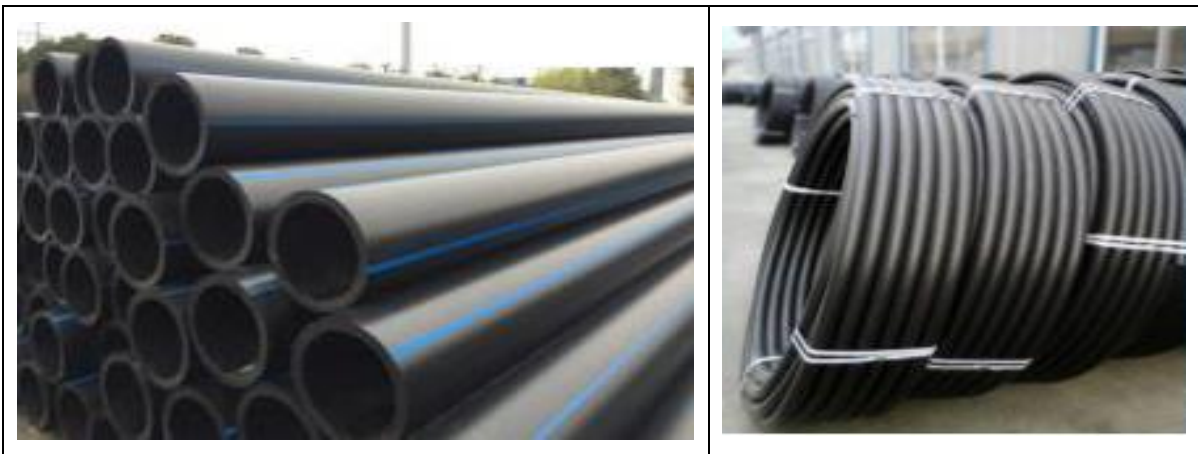
⁶ <https://bs.uchebniksantehnika.ru/cijevi/armirane-betonske-cijevi-karakteristike-i-primjena.html>, [датум приступа: 29.05.2019.]



Слика 2.4 ПВЦ цеви различитих пречника⁷

Полиетиленске цеви (Слика 2.5). Полиетилен је високомолекуларни производ настао полимеризацијом гаса етилена. Користи се за транспорт флуида код водовода, канализације, гасовода као и у процесној и хемијској индустрији. Основне предности полиетиленских цеви су:

- побољшана отпорност на пуцање,
- боље перформансе под екстремним температурама,
- изузетна флексибилност,
- добра компатибилност заваривања,
- једноставно руковање.



Слика 2.5 Полиетиленске цеви

У односу на проток радног флуида, цевоводи могу да буду магистрални, дистрибутивни и потрошачки [17]. Највеће количине радног флуида транспортују се путем магистралних цевовода, са пречницима цеви које се крећу у границама ДН250 до ДН1000. Пречници дистрибутивних цевовода су у границама од ДН100 до ДН250, осим за дистрибутивну канализацију која је обично ДН300 (минимум ДН250). Потрошачки цевоводи су пречника ДН50 до ДН100, док је потрошачка канализација преко ДН100.

⁷ <https://shopsale.storesonline2022.ru/category?name=bele%20pvc%20cevi>, [датум приступа: 29.05.2020.]

У односу на начин вођења радног флуида од извора до потрошача, цевоводни системи могу да буду: гранати (линијски), прстенасти и мрежни (комбиновани) [17].

Гранати (линијски) цевоводи спајају потрошаче са извором радног флуида најкраћим путем, што директно утиче на трошкове изградње. Трошкови изградње овог система цевовода су нижи у односу на прстенасти и мрежни систем. Гранати системи се најчешће примењује код магистралних цевовода.

Прстенасти цевоводи. Овај систем цевовода се најчешће примењује када је потребно обезбедити повећану сигурност снабдевања радним флуидом крајњих корисника. Обично се примењују у градским зонама, где је на једном месту сконцентрисан већи број потрошача. Уколико дође до квара у мрежи потрошачи ће наставити да добијају радни флуид краћим или дужим путем. У случају да у исто време дође до два квара може се десити да дође до прекида радног флуида, али је вероватноћа тог догађаја мала. Мана овог система у односу на гранатни систем јесте повећана цена, тако да се примењује само у оправданим ситуацијама.

Мрежни систем. Комбинацијом прстенастог и гранатог система настаје мрежни систем. Овакав систем водоводне мреже израђен је, на пример код града Новог Сада.

У односу на начин спајања елемената цевовода, цевоводи могу да буду са завареним спојевима, навојним спојевима, наглавцима, прирубничким спојевима и са комбинованим спојевима [17]. Што се тиче чврстоће и заптивености заварени спој је најпоузданији. Међутим, нерастављиви спојеви попут овога не примењују се у ситуацијама где се елементи цевовода често поправљају или замењују. Поред овог и спојеви са наглавцима су нерастављиви али су једноставнији за примену и не захтевају нарочито обучене извођаче радова. Спојеви са наглавцима и навојни спојеви се користе код цевовода са мањим притиском. Прирубнички спој је специјалан случај навојног споја (холендер) и он је растављив. У пракси се најчешће користе комбиновани спојеви.

У односу на температуру зида цевовода, цевоводи могу да буду са променљивом или уједначеном температуром [17]. Температура радног флуида (унутрашња температура) и температура околине (спољна температура) највише утичу на температуру зидова цеви. Промена температуре зидова цеви узрокује одређен степен дилатације цеви. Због тога је у фази пројектовања пожељно да се докаже да је тај утицај сувише мали.

У односу на температуру замрзавања (мржњења) земљишта у коме се цевоводи налазе, постоје цевоводи који могу да буду смештени у зони замрзавања (топоводи, гасоводи који транспортују сув гас и енергетски, оптички и телекомуникацијски каблови) и они који морају да се полажу испод зоне замрзавања (водовод, канализација и гасовод који транспортује влажан гас) [17].

У односу на вођење цевовода, једни у односу на друге, постоје цевоводи који се постављају појединачно, са заједничким вођењем или полагање групе цевовода у заједничке канале (колекторе). Колектори су најбоље решење гледано са техничке стране. Међутим, постоји неколико разлога због којих се на нашим просторима колектори ретко примењују у пракси. Два разлога су најважнија [17]:

- трошкови изградње колектора су далеко већи у односу на постављање појединачних цевовода и
- различите организације и предузећа одржавају подземне инсталације које су у њиховој надлежности.

Због свега наведеног, често се у пракси дешава да долази до укрштања различитих водова, нарочито у насељеним местима где постоји велик број водова различитих намена.

Према намени, цевоводи могу да буду: водовод, канализација, топловод, гасовод, нафтовод и дренажни системи.

2.1.1 Водовод

Комплекс објеката и појединачних цевовода који су повезани у систем за добијање воде из различитих природних изворишта, њено пречишћавање и дистрибуција до потрошача назива се водоводна мрежа, или краће, водовод [19].

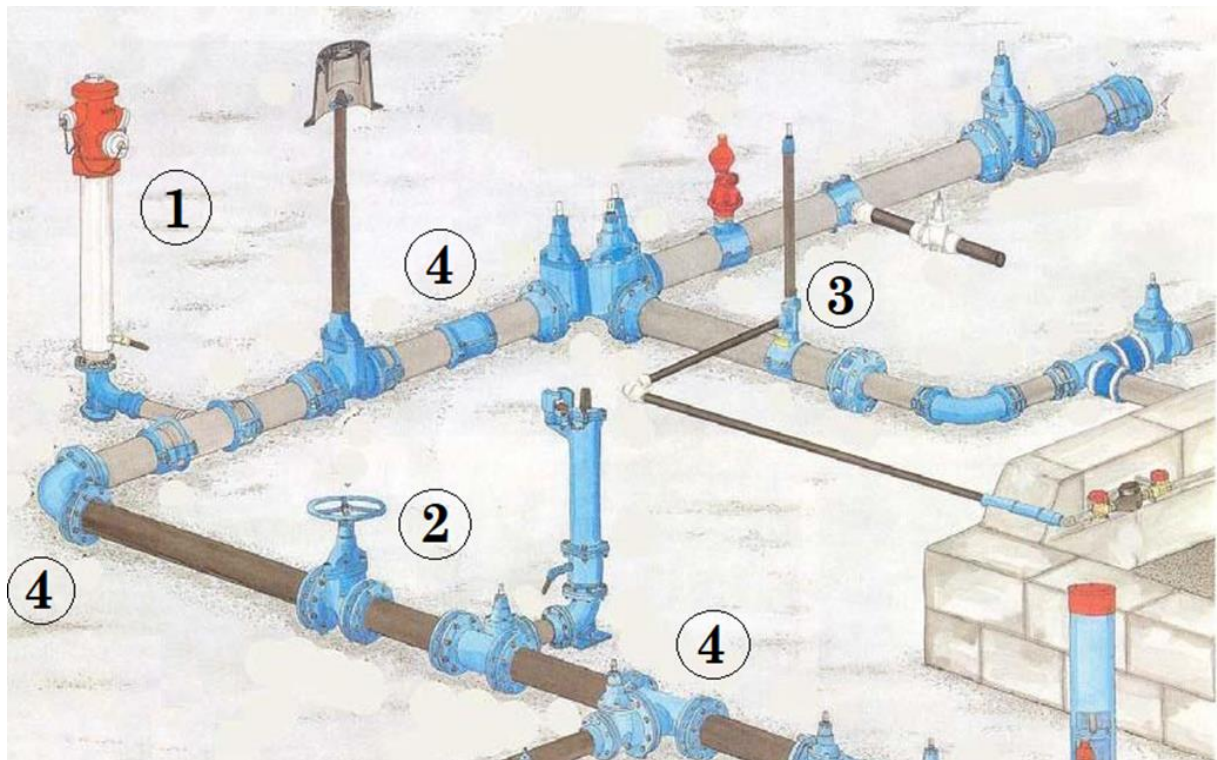
Према намени, водоводна мрежа се дели на: комуналну (за снабдевање водом насељених места), индустријску (за снабдевање индустрије), пољопривредну (за снабдевање пољопривредних површина) и специјалну (пожарна, аеродромска и слично). У зависности од топографије терена вода се доводи транспортним објектима под утицајем гравитације, под притиском или комбиновано. Водоводни систем се састоји од:

1. Изворишта,
2. Фабричке воде,
3. Резервоара,
4. Пумпних станица,
5. Разводне мреже и
6. Пратећих објеката на мрежи (затварачи, ваздушни вентили, испусти, хидранти и други пратећи елементи).

Поред наведених, важна подела са становишта ДОПИ је на: доводне, разводне и прикључне. У оквиру ове дисертације акценат је на разводној мрежи, коју је неопходно детектовати и анализирати добијене резултате на адекватан начин. Разводна мрежа служи за транспорт воде појединим потрошачима и мора да обезбеди потребне количине воде до сваког потрошача са

одговарајућим притиском. Дистрибуција воде у систему врши се преко довода, цевне мреже, резервоара односно торњева за воду и црпних станица. Главни доводи су цевоводи који се налазе између водозавода и црпне станице, односно постројења за пречишћавање и подручја водоснабдевања. За дистрибуцију воде користе се сви наведени материјали цевовода.

У циљу дистрибуције воде, водоводна мрежа карактеристична је и по великом броју фазонских комада (Слика 2.6, ознака 4), као и додатних уређаја попут: таложница, затварача (Слика 2.6, ознака 2), ваздушних вентила, повратних поклопаца, редукционих вентила, хидраната (Слика 2.6, ознака 1), прикључних огрлица, прикључака (Слика 2.6, ознака 3) славина и слично који представљају саставни део водоводне мреже.



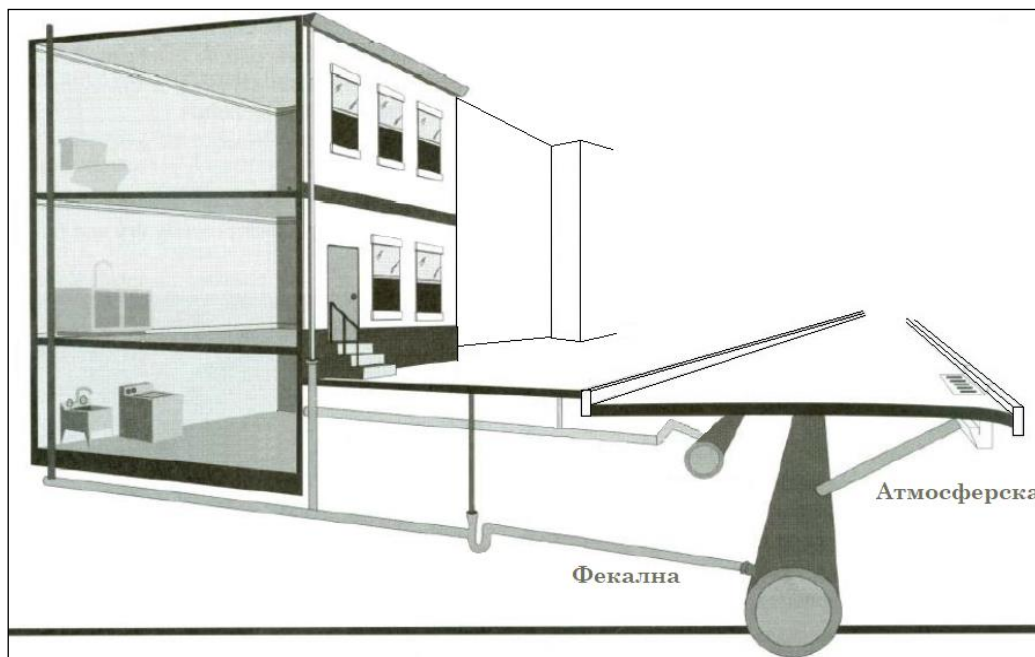
Слика 2.6 Саставни делови водоводне мреже

2.1.2 Канализација

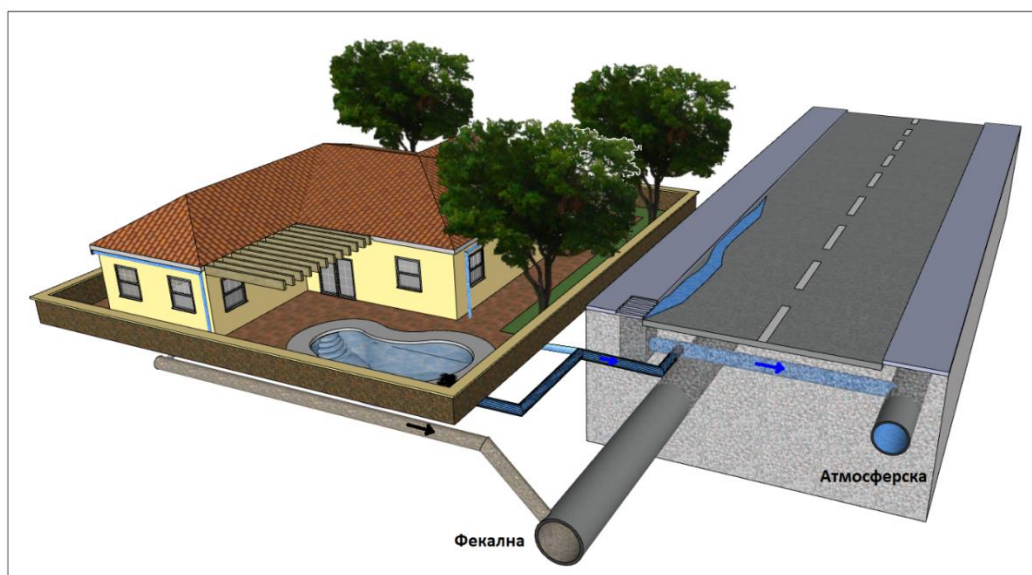
Низ техничких уређаја са пратећим објектима који служе за сакупљање и одвођење отпадних вода назива се канализација [18]. Канализација одводи сву отпадну воду (фекалну, потрошну, индустријску, атмосферску и осталу) са насељеног подручја, на погодно место (директно у речни слив или се претходно врши делимично или потпуно пречишћавање).

Према начину одвођења отпадних вода постоје два система канализације: општи (мешовити) и сепарациони (одвојени) [19].

Општи систем. Код овог система постоји само један канал за одвод отпадне и атмосферске воде (Слика 2.7). Због избегавања велике мреже канала општи систем се најчешће примењује у равничарским подручјима. Позитивне стране општег система огледају се у томе да је у свакој улици неопходно изградити само један канал. Са друге стране то захтева канале већих пречника као и веће уређаје за пречишћавање. Такође, негативна страна је и та да постоји могућност плављења подрума и преливања разређених отпадних вода у реципијент услед већих падавина.



Слика 2.7 Општи систем канализације

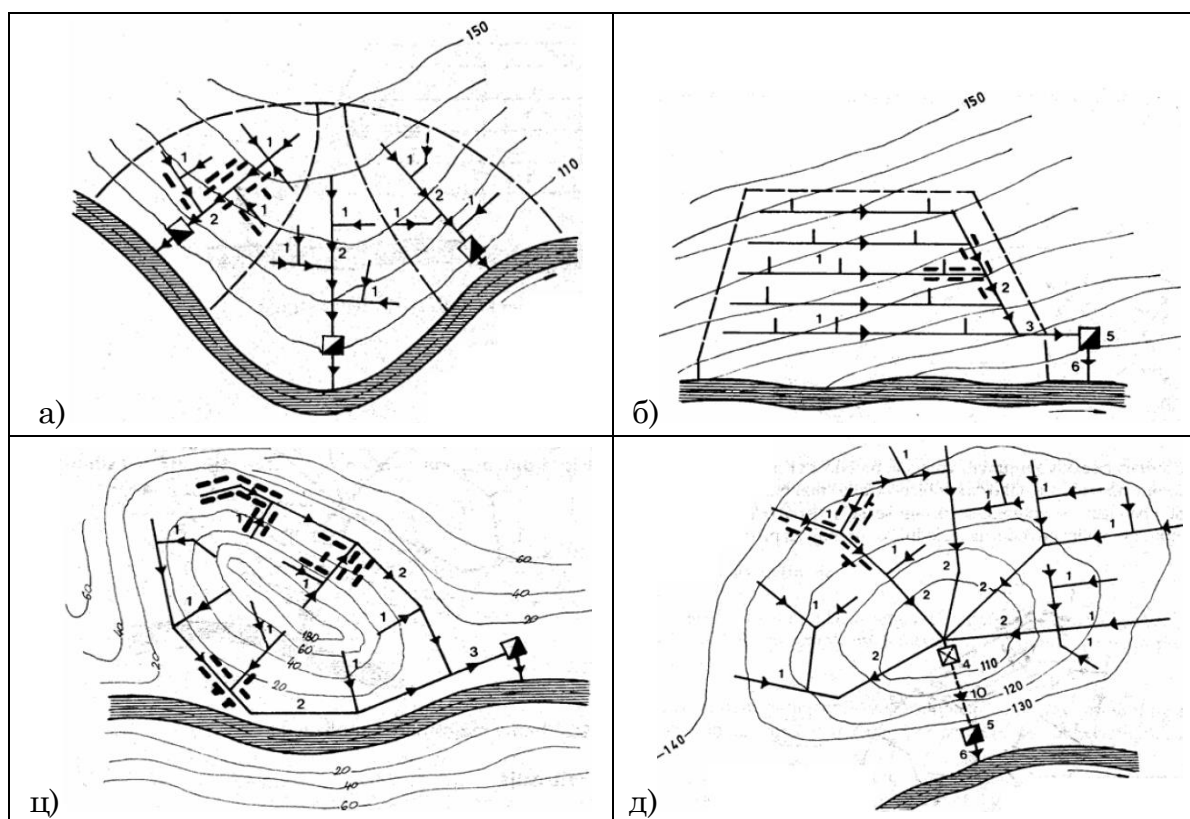


Слика 2.8 Скица сепарационог система канализације

Сепарациони систем. У овом случају постоје одвојени канали за одвод атмосферских падавина и канали за све кућне и индустријске отпадне воде.

Сепарациони систем може бити потпун и непотпун. Разлика се огледа у томе што код потпуног система постоји посебна каналска мрежа за одвод атмосферских вода (Слика 2.8), док се код непотпуног система атмосферска вода одводи слободно по улицама и другим површинама.

У зависности од конфигурације терена и положаја реципијента, систем канализације може бити: радијалан (а), паралелан (б), прстенаст (ц), разгранат (д) (Слика 2.9).



Слика 2.9 Систем канализације у зависности од конфигурације терена и положаја реципијента

Радијалан систем се примењује на теренима где није економично одводити сву отпадну воду на једно место, тако да у овом случају постоји неколико сабирних тачака. Код паралелног система главни сабирни канал је паралелан са реципијентом, а остала мрежа постављена је у правцу највећег пада терена. Овај систем гради се обично у насељима која се налазе уз реку. Карактеристика прстенастог система огледа се у распореду одводних канала који се сустичу у једној сабирној тачки обликујујући изглед обруча (прстена). Једна сабирна тачка налази се и код разгранатог система. С тим што канали код овог система нису међусобно паралелни нити управни и сустичу се у једној чворној тачки.

Канализациона мрежа се израђује од цеви различитих материјала и облика који треба да обезбеде несметано отицање флуида и при најмањим нагибима цеви. Најчешћи се користе индустријски профилисани цевни елементи, и то:

керамичке цеви, ливене гвоздене цеви, азбестцементне, пластичне и бетонске цеви. У случају да кроз цеви протиче флуид пуним профилем, онда је најповољнији кружни попречни пресек, док је у случајевима мањих протока често применљив облик цеви елипсоидног попречног пресека.

За правилан рад и функционисање канализационе мреже потребно је изградити и низ помоћних објеката, попут: ревизионих окана са или без каскада, сливника за атмосферску воду, преливних комора, сифона, отвора за испирање мреже, окана за убацивање снега, кућних прикључака, објеката за пречишћавање отпадних вода и излива у реципијенте.

2.1.3 Топловод

Топловодни цевоводи су затворени објекти под притиском који служе за допремање одређеног флуида до потрошача ради загревања просторија у објектима. Загревање објеката може бити: индивидуално, локално или централно. Код индивидуалног загревања загрева се један објекат/зграда у коме је смештен котло. У случају да се из једног котла загрева блок објеката/зграда ради се о локалном загревању. Централно загревање подразумева да се већи комплекс (нпр. делови града или цео град) загрева из једног центра - топлане, што се назива даљинским грејањем [19].

Према флуиду који преноси топлоту, грејање може бити: парно, водено и ваздушно, док се према броју цеви топоводни системи могу поделити на: једноцевни, двоцевни, троцевни и четвороцевни систем. Једноцевни систем даје целокупан огревни флуид потрошачу, којег он користи у потпуности. Код двоцебног система један део или целокупан долазни медијум враћа се назад произвођачу. Троцевни систем води два флуида са различитим параметрима кроз две цеви до потрошача, а затим враћа део или читав флуид кроз две цеви назад до произвођача. За пренос флуида до потрошача најчешће се користе двоцевни системи. Када се снабдевање врши из само једног извора ради се о топоводној мрежи која се назива „граната“, док се за случај више извора топлана ради о „кружном“ систему.

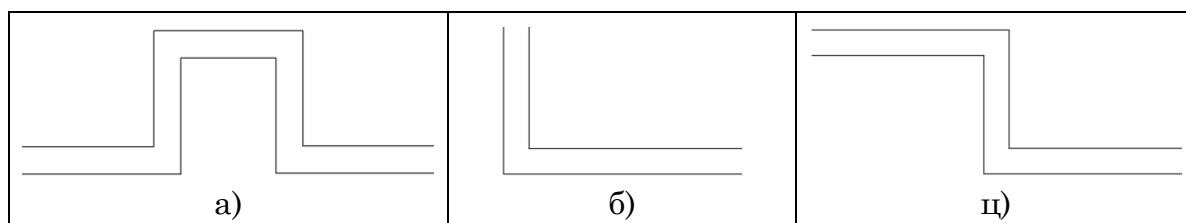
Топловод се најчешће уграђује као подземни док се у неким случајевима (нпр. фабрички кругови) могу реализовати надземно. Ако се изузму колектори, постављање цевовода испод земље врши се на два начина (Слика 2.10):

- а) Постављање топоводних цеви у земљани ров и
- б) Постављање топоводних цеви у армирано-бетонски канал.



Слика 2.10 Пример топловода у земљаном рову (лево) и бетонском каналу (десно)

Армирано-бетонски канали најчешће се израђују од фабричких монтажних елемената, са стандардним димензијама од $75 \times 50 \text{ cm}$ до $250 \times 150 \text{ cm}$. Ова дисертација обухвата, између осталих, и детекцију топловодних цеви постављених у земљани ров, док је препознавање топловодних цеви које су постављене у бетонски канал детаљније анализирано у раду [20]. Због значајних температурних промена и материјала израде цевоводи су изложени (без обзира који од два наведена система за полагање цеви се примењује) деформацијама у виду истезања. Деформације је потребно омогућити на погодан начин, како не би дошло до општећења или пуцања цеви. У том циљу уграђују се посебни елементи тзв. компензатори (лире), које те промене преузимају на себе. Компензатори се најчешће уграђују у облику латиничних слова: У (Слика 2.11а), Л (Слика 2.11б) и З (Слика 2.11ц).



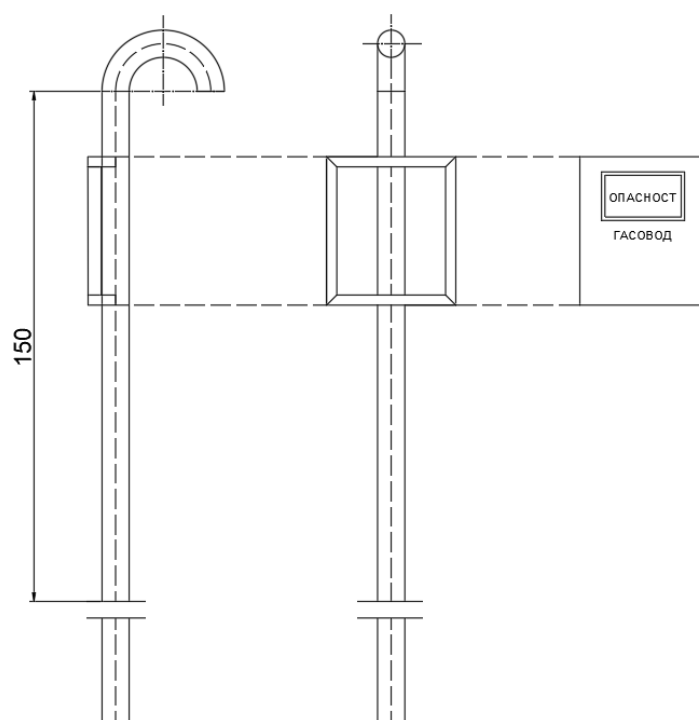
Слика 2.11 Различити облици компензатора (топловодних лира)

Уколико се цеви постављају у бетонске канале оне се често монтирају на клизне ослоње. Поред наведених компензатора и клизача саставни део топловодне мреже су и затварачи, таложнице за кондензат, вентили за испуштање ваздуха и отварачи за пражњење цеви. Ови елементи се смештају у коморе или шахтове који обавезно имају уграђен одвод до канализационе мреже.

2.1.4 Гасовод

Гасоводна мрежа представља пренос природног гаса од произвођача до потрошача користећи систем цеви, објеката, постројења и додатних уређаја [18].

Према пореклу, гас се дели на: природни, вештачки и технички гас [18]. Потрошачи су углавном гасни апарати и котлови у којима природни гас сагорева при чему се добија топлота. Према капацитетима трасе, гасоводна мрежа је подељена на: магистралне водове, разводни гасовод и дистрибутивну градску мрежу. Највећи притисци су на магистралним цевоводима (преко 50bar), којима се допремају највеће количине природног гаса. Дистрибутивни гасоводи по насељима имају притисак до 16bar за челичне цевоводе или до 4bar за цевоводе од пластичних материјала (најчешће полиетилен). Из безбедносних разлога притисак у гасоводним цевима у индивидуалним домаћинствима је најмањи и износи до 25mbar . Регулисање притисака у мрежи врши се у мерно-регулационим станицама, док се за транспорт гаса користе цеви различитих материјала: гвожђе, челик, азбест, пластика. У пратеће елементе гасовода убраја се вентилација у виду одушних лула (контролне капе) (Слика 2.12), која се поставља на сваких $50\text{-}100\text{m}$ у зависности од профила вода и опасности од квара.



Слика 2.12 Скица одушне луле

За правилно функционисање целокупног гасоводног система поред одушних лула дуж трасе гасоводне мреже постављају се и други објекти и уређаји, и то: шахтови, чистачка места, сифони, затварачи, регулаторске станице, резервоари и кућни прикључци.

2.1.5 Нафтовод

Цевоводи који са пратећим уређајима, постројењима и објектима транспортују угљоводоник у течном или гасовитом стању називају се нафтоводи.

Изградња нафтовода по правилу се врши изван насељених места (осим локалних којима се врши транспорт за потребе индустрије и шире потрошње), предузећа, железничких станица, морских и речних пристаништа и објеката сличне намене.

Према начину преноса, нафтоводи могу бити за међународни, магистрални и локални транспорт. Међународни нафтовод подразумева да се његов почетак и крај не налазе у оквиру територијалних граница једне државе. На нафтном пољу сирова нафта се из више бушотина транспортује сабирним цевоводима до сабирних станица чији број првенствено зависи од капацитета и распореда бушотина. Пречници сабирних цевовода такође зависе од капацитета бушотине и обично су од 100-150 m али могу да буду и већи. У сабирним станицама врши се пречишћавање сирове нафте. Свака сабирна станица поседује и уређаје за одвајање гаса који је редован пратилац сирове нафте. Из добијеног гаса одвајају се бутан и пропан као и сумпор и угљен-диоксид уколико су присутни у гасу. У случајевима када притисак и температура дозвољавају, издвајање гаса из сирове нафте започиње у сабирним цевоводима. Пречишћена сирова нафта из више сабирних станица се транспортује цевоводима до отпремне станице. Даљи пренос пречишћене нафте врши се магистралним цевоводом до рафинерије или утоварне станице ако се транспорт до рафинерије обавља превозним средствима (танкерима, вагонима или ауто цистернама). Пречници магистралних цевовода су обично изнад 500 m , а њихова дужина већа од 50 km [21].

Нафта се до рафинерија доводи цевоводима, који су често дуги и великих пречника. За пренос нафте користе се челичне цеви различитих профила, који зависи од притисака у цевима, капацитета нафтовода и других техничких норматива [18].

Саставни делови нафтовода су: пумпне станице, системи катодне заштите, арматуре, мерно-регулациона опрема, систем за даљински надзор и управљање, телекомуникациона мрежа за потребе система даљинског надзора и друга одговарајућа постројења и уређаји. Пумпне станице се постављају на појединим тачкама цевовода (по потреби), за загревање нафте и подизање притиска нафте у цевима.

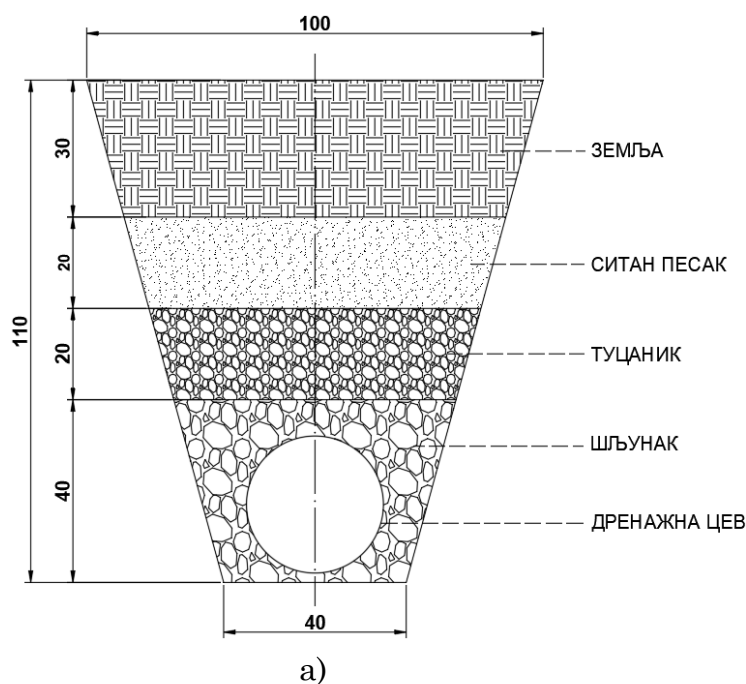
Помоћне пумпне станице се обично граде у близини насељених места, дуж трасе магистралног цевовода. Растојање између главне пумпне станице и прве помоћне станице износи од 100-150 km , док је растојање између помоћних пумпних станица 50-80 km [21].

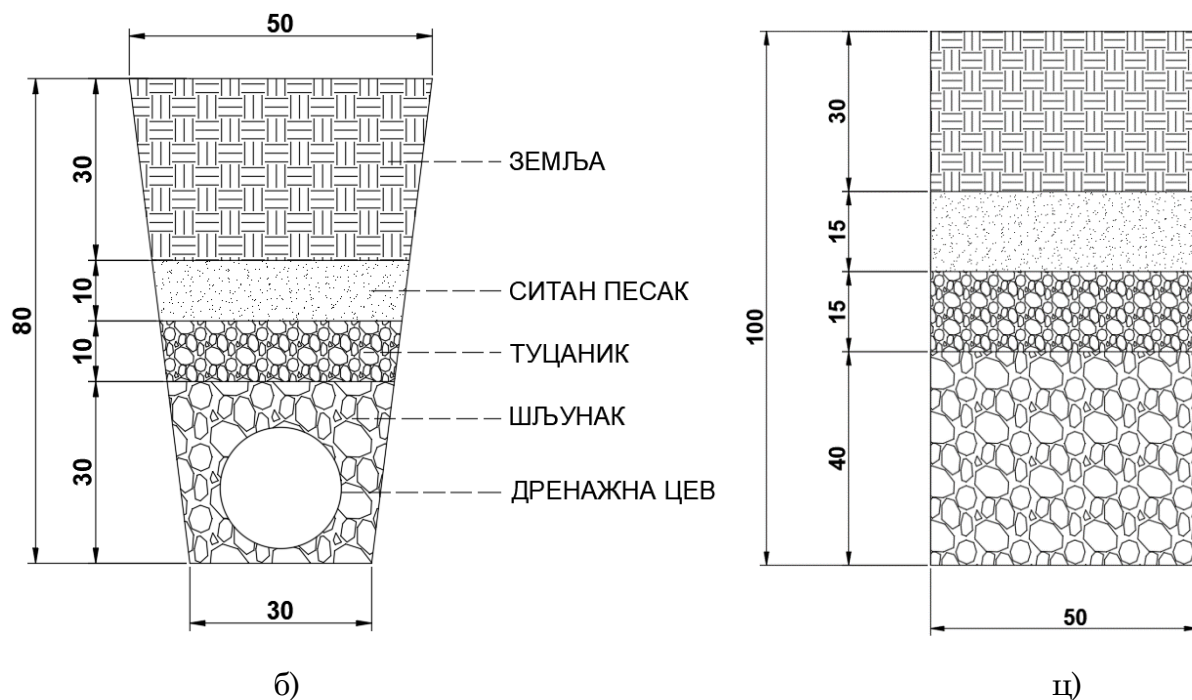
2.1.6 Дренажни системи

Дренажни систем служи за одвођење вишка надземних или подземних вода које избијају на површину. Састоји се од система перфорираних цеви и затворених канала (дренова) који имају способност пријема и одвођења вишка воде.

У зависности од намене, дренажа се дели на: систем дренажних цеви за исушивање тла – отвори на цевима су окренути ка површини тла, и систем дренажних цеви за наводњавање тла – отвори на цевима су окренути наниже. У складу са наведеном поделом дренажна мрежа може бити: хоризонтална, вертикална или комбинација хоризонталне и вертикалне. Хоризонтална дренажа је сачињена од низа цеви/канала, обично са благим падовима чија густина и распоред примарно зависе од састава земљишта и рељефа терена. Вертикална дренажа представља систем специјализованих бушотина или цевних бунара који досежу у водоносни слој. У циљу смањења нивоа подземне воде из водоносног слоја пумпама се црпи вода. Оправданост коришћења вертикалне дренаже јесте уколико једна бушотина може да обезбеди одводњавање са површине од 20 – 30ha, при радијусу утицаја већем од 300m.

У зависности од капацитета дренажних канала, врши се подела на дренажне канале првог, другог и трећег реда (Слика 2.13).





Слика 2.13 Попречни профил дренажног канала првог (а), другог (б) и трећег реда (ц)

У зависности од педолошких, хидрогеолошких и услова рељефа, дренажна мрежа може бити: систематска, делимична и критична дренажа. **Систематска дренажа.** Систематска дренажа је у пракси често коришћена а састоји се од више дренажних линија које су најчешће на једнаким растојањима. Растојање између дренажа примарно зависи од врсте земљишта. Примењује се код добро пропустљивих земљишта са приближно уједначеним педолошким, хидрогеолошким и рељефним условима.

Делимична дренажа. Ова врста дренажног система се примењује у случајевима када се превлажавање земљишта појављује само на мањим надморским висинама терена од интереса - депресијама. Растојање између дренажа не мора бити уједначено, а дренажи се пројектују само за превлажену зону.

Критична дренажа. Примена дренажног система ове врсте карактеристична је за слабопропусна (глиновита) земљишта. Дренажи се израђују специјализованим машинама у виду подземних ходника, на дубинама од 0.8 - 1.2m, док за ободне дренаже ова дубина може бити и до 2m.

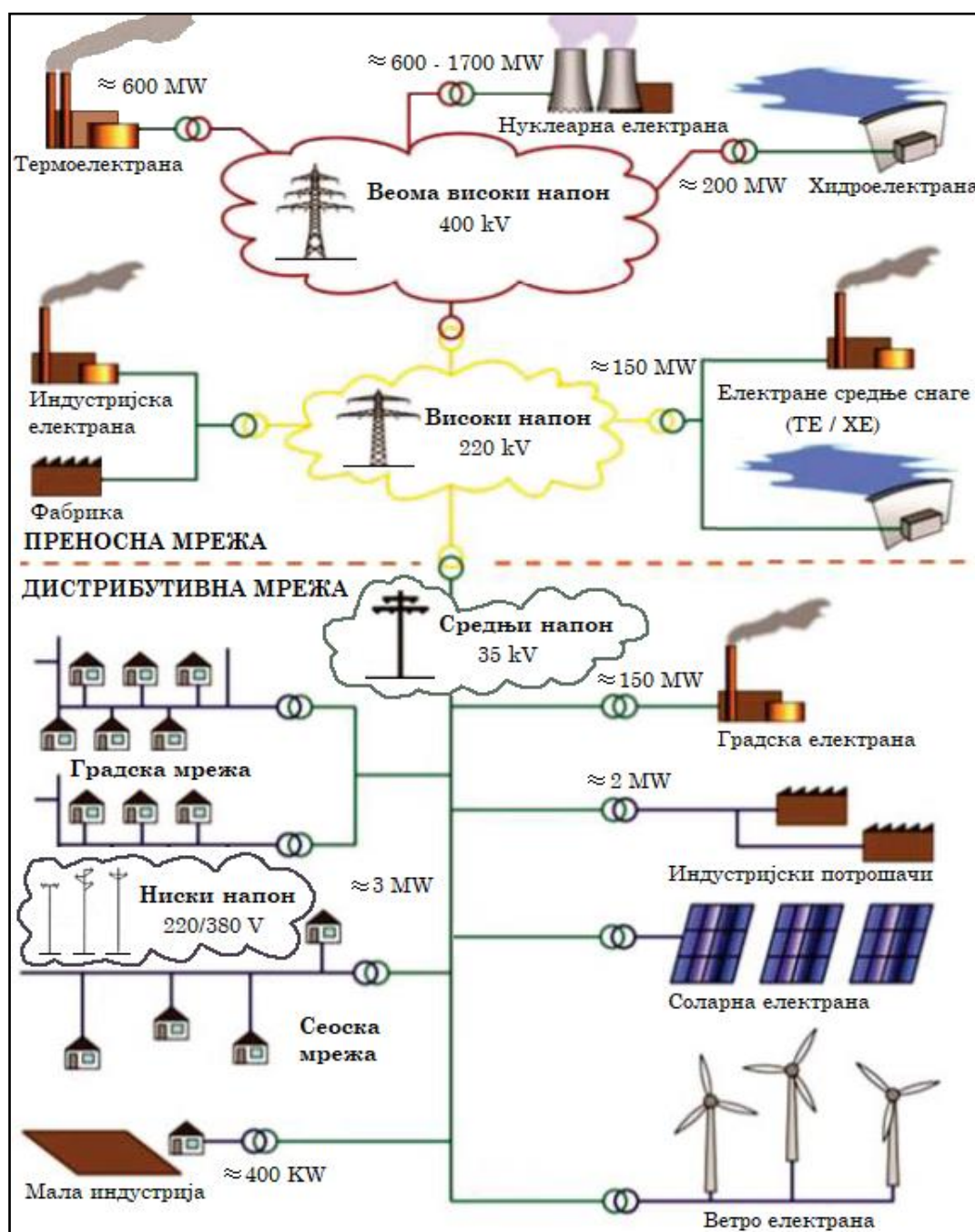
На стрмим теренима систем дренажних цеви се поставља приближно по изохипсама.

2.2 Каблови

Према намени, каблови се могу сврстати у две основне групе: електроенергетска и телекомуникациона мрежа.

2.2.1 Електроенергетска мрежа

Систем објеката, постројења и водова који служе за производњу, пренос и дистрибуцију електричне енергије од места производње (електране) до потрошача назива се електроенергетска мрежа (Слика 2.14).



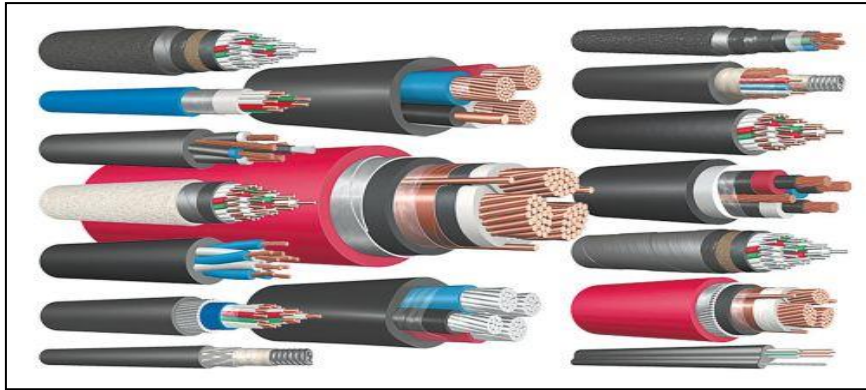
Слика 2.14 Шематски приказ преносне и дистрибутивне електроенерг. мреже

Према висини напона, електроенергетска мрежа се дели на мрежу веома високог, високог, средњег и ниског напона. Електрична енергија веома високог и високог напона производи се у електранама (хидроелектране, термоелектране, нуклеарне електране), а пренос електричне енергије врши се путем далековода до великих потрошачких центара (Слика 2.14). На овај начин електрична енергија преноси се до периферије великих потрошачких центара, где се преко трафостаница трансформише у електричну енергију од $110kV$. Надаље, ова електрична енергија се путем разводне мреже преноси до разводних трансформатора где се трансформише у електричну енергију средње високог напона од $10-35kV$. Овим напонем напајају се велики потрошачи, индустрија и град. До крајњих корисника потребно је извршити још једну трансформацију електричне енергије на вредност ниског напона од $220/380V$ која се користи за широку употребу у домаћинствима. Мреже ниског напона могу бити: отворене (радијалне), затворене и замкасте [18], [19].

- Код отворених мрежа један или више огранака воде до главних разводних тачака. Од ових тачака одвајају се мањи огранци до крајњих потрошача. Карактеристика овог система огледа се у лакој проналажењу места квара, јер се напајање електричном енергијом врши само са једне стране.
- Затворен систем подразумева да се свака тачка у мрежи напаја са две или више страна. Овакав систем омогућава да се у случају квара са једне стране, мрежа може напајати са друге стране.
- Карактеристика замкасте мреже огледа се у систему затворених влакова који се сустичу у чворним тачкама. На чворним местима најчешће се налазе трафостанице.

Према начину преноса електричне енергије, електроенергетска мрежа се дели на надземну и подземну. Пренос струје високог напона (напон $100kV$ и већи) врши се надземно, док се струја ниског и средњег напона преноси надземним или подземним водовима. Подземни водови (каблови) деле се на каблове ниског напона до $35kV$ и каблове високог напона преко $35kV$. Избор положаја водова зависи од посебних услова подручја од интереса, које прописује радна организација задужена за планирање, реконструкцију, изградњу и одржавање електроенергетског система одређеног подручја [18]. У складу са наведеном поделом за истраживање у оквиру дисертације у фокусу су електрични водови ниског и средњег напона, јер се они полажу подземно.

Према броју проводника, мреже ниског напона могу бити: једножичане (једносмерна струја), двојичне (једносмерна и наизменична струја), тројичне (једносмерна струја и трофазна мрежа за моторе) и четворојичне (наизменична струја ниског напона за општу употребу) [19]. Код ниског и средњег напона израђују се каблови са изолацијом од пластичне масе (Слика 2.15).



Слика 2.15 Врсте електроенергетских каблова

Према врсти изолације, електроенергетски каблови се деле на: каблове са папирном изолацијом, папирном изолацијом у уљу и гасу, каблови са синтетичком изолацијом, са гасом и суперпроводне каблове [18].

2.2.2 Телекомуникациона мрежа

Телекомуникациона мрежа је скуп телекомуникационих система и средстава, која омогућава пренос сигнала између одређених мрежа помоћу жице, оптичког кабла или других електромагнетних средстава, као што су сателит, копнена мрежа, фиксна и мобилна телефонија, радио-телевизијска мрежа и мрежа кабловске телевизије.

С обзиром на средство којим се врши пренос, деле се на телекомуникације са жичним и бежичним преносом. У жични пренос се убрајају: телефонски и телеграфски пренос, радио и телевизијски пренос, пренос података и друго. Бежични пренос се врши преко радио, релејних антенских и телевизијских стубова и репетитора [19].

Оптички каблови

Интензивирање развоја технологије израде и примене оптичких водова је у највећој мери узроковало замену бакарних водова са оптичким за потребе преноса података. Оптички каблови су сачињени од неметалних оптичких влакана (Слика 2.16).

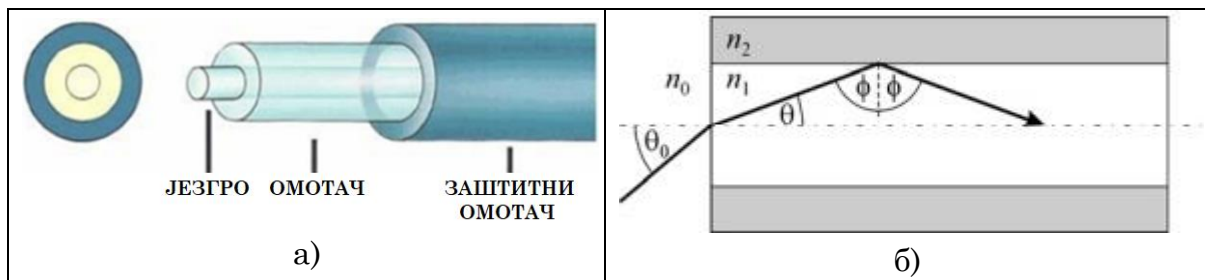


Слика 2.16 Примери оптичких каблова^{8,9}

⁸ <https://www.fks.co.rs/fks/nova/tkl/optika/optika.htm>, [датум приступа: 24.08.2019.]

⁹ <https://www.antenall.rs/sr/proizvodi/opticki-kablovi/>, [датум приступа: 25.07.2019.]

У овом случају информација се преноси путем светлости. Како би се овај пренос омогућио, на уласку у оптичко влакно електрични сигнал се конвертује у светлост помоћу предајника, а на пријемном делу се помоћу фотодиоде поново претвара у електрични сигнал. Оптичка влакна имају концентричну слојевиту структуру. У средини се налази језгро са пречником у распону од неколико до више стотина микрона (Слика 2.17а). Светлост се простире кроз језгро влакна рефлексijом од граничних површи под различитим угловима (Слика 2.17б). Ако је угао већи од критичне вредности долази до појаве тоталне рефлексije, што подразумева да светлосни зрак остаје заробљен у језгру влакна, јер се исти угао рефлексije понавља при сваком судару са граничном површи.



Слика 2.17 Структура оптичког кабла¹⁰ (а) и простирање светлости кроз језгро (б)

Предности оптичких каблова у односу на бакарне огледају се у следећем:

- Мање димензије,
- Пренос веће количине информација,
- Мало слабљење сигнала,
- Мања тежина по дужном метру,
- Једноставније полагање,
- Нису осетљиви на температурне разлике, електричне сметње.

Према положају, телекомуникациони водови могу бити, надземни, подземни и подводни. Подземни каблови у градском подручју се најчешће постављају у кабловске цеви. Ове цеви су бетонски блокови различитих облика, који имају отворе кроз које се провлаче каблови. Канали такође могу бити израђени и од других материјала (азбестцемент, ПВЦ, челик и друго). У случају неповољних теренских услова или економских разлога, уместо подземних телекомуникационих каблова, постављају се каблови надземно на стубове или кровна упоришта [22]. У оквиру ове дисертације акценат је на жичаном преносу подземним путем.

Подземни каблови најчешће се смештају у цеви погодног материјала (кабловска канализација). На овај начин обезбеђује се брза и лака замена и

¹⁰ https://etf.unibl.org/attachments/article/650/Predavanja_7.pdf, [датум приступа: 25.07.2020.]

поправка постојећих каблова без оштећења површинског слоја (улица, тротоар) као и заштита каблова од механичких повреда и корозије. Кабловска канализација се састоји од [18]: канализационих цеви, кабловских окана и кабловских галерија.

Поред каблова, главни елементи телекомуникационе мреже су:

- кабловски шахтови (окна),
- ормари,
- разводиште,
- кабловско камење и
- телефонске кабине.

Кабловска окна се постављају на местима ломова и рачвања трасе. Кабловски ормари служе за развод мреже у појединачне зграде. На местима преласка у надземне или унутрашње кућне водове постављају се кабловска разводишта (на стубове или зидове ограда). За спољно обележавање трасе укопаног вода поставља се кабловско камење или железне плоче.

2.3 Правила полагања подземних водова

Процес полагања подземних водова дефинисан је правилима која се наводе у наредним поглављима.

2.3.1 Опште одредбе

У фази планирања и избора локације појединих водова примењују се неки од следећих критеријума и услова [19]:

- а) Физичко-хемијске особине медијума. Физичке особине (гравитација, притисак) утичу на смештање водова у вертикалној равни, док хемијске особине (гас, загађена вода) утичу на њихов хоризонталан положај.
- б) Економичност има важну улогу. У том смислу потребно је дужину и промене правца трасе свести на минимум. Такође, на трошкове извођења радова важну улогу има и дубина укопавања, јер земљани радови чине око 30% свих трошкова изградње мреже.
- ц) Водови који су подложни замрзавању флуида морају бити смештени на дубини већој од критичне дубине замрзавања.
- д) Водови морају бити организовани тако да не ометају рад или оштећују уређаје и медијуме суседних водова. Због тога се каблови високог напона постављају испод каблова ниског напона, канализација испод водовода и слично.
- е) Постављање водова се по правилу врши изван зоне утицаја притиска зграде или неких других објеката.
- ф) Водови се не постављају један изнад другог тј. у истој вертикалној равни. Овакав просторни распоред водова дозвољен је само код колектора и код кабловске мреже.
- г) У случају квара просторни распоред водова не сме да угрози живот и здравље крајњих корисника. Кварове је потребно свести на минимум. Нарочито су опасни електрични водови у случају њиховог оштећења, што је чест случај код земљаних радова када се не зна тачан положај вода.

Генерално, водови се постављају од реципијента/фабричких кругова до насељених места, између њих или у зони насељених места. Водови треба да се укопавају паралелно са осом улице или са регулационом линијом. Секундарни, потрошни водови смештају се ближе објектима/зградама у односу на примарне водове.

Полагање водоводних цеви испод путева захтева одговарајућу заштиту, како не би дошло до оштећења вода.

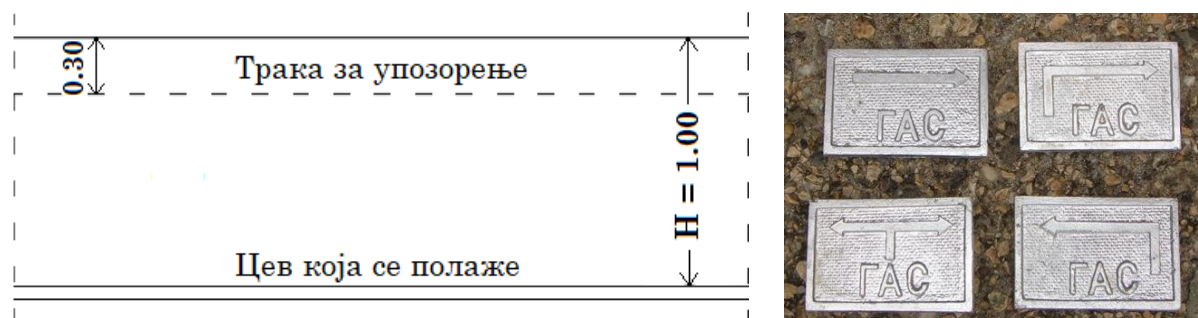
Кућни прикључци канализационе мреже могу бити изведени на различите начине, што зависи од система канализационе мреже. Прикључне цеви постављају се под углом од 45 степени у правцу отицања воде са падом од 1 до

3% [16]. Ако је висинска разлика између уличне и кућне канализације већа од 30cm, кућни прикључак се изводи преко каскаде [22].

Топловодне цеви морају бити потпуно изоловане од корозије и влаге. Због тога се често постављају у заштитне бетонске канале, који морају бити заштићени од продирања воде.

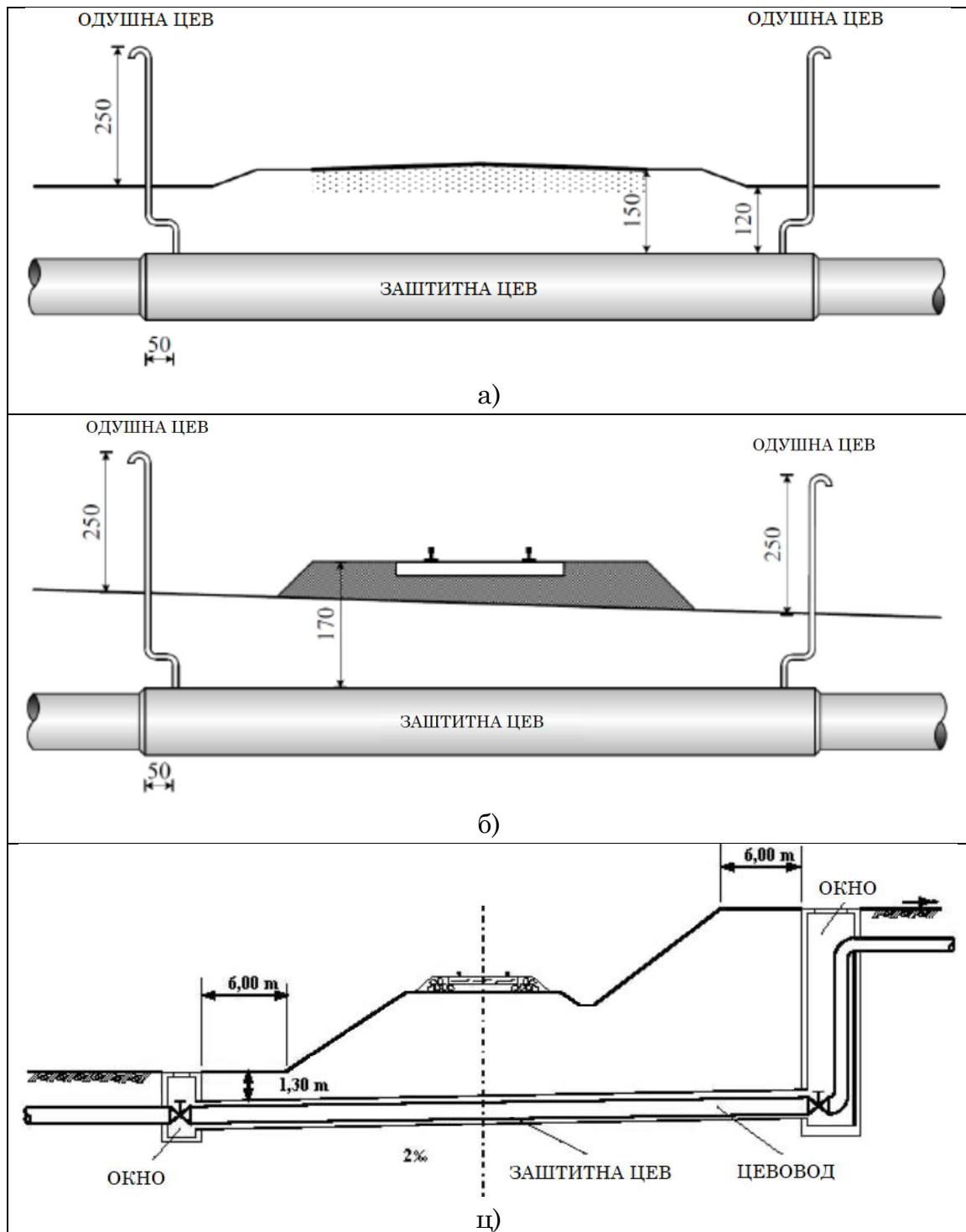
Гасовод се у насељеним местима по правилу поставља у регулационом појасу саобраћајница, у инфраструктурним коридорима. Надземно полагање гасовода од полиетиленских цеви није дозвољено, док је надземни гасовод од челичних цеви дозвољен само у кругу индустријских постројења. Гасовод не сме пропуштати гас и мора бити довољно чврст да безбедно издржи дејство свих сила којима ће према очекивањима бити изложен током изградње, испитивања и коришћења. На равном делу трасе, размак између ознака за обележавање гасовода не сме бити већи од 200m. Такође, ознаке морају бити постављене на сваком месту промене правца трасе гасовода. На пролазу гасовода испод водених токова, канала, путева и пруга, ознаке за обележавање трасе гасовода и знаци за упозорења морају бити постављени са обе стране воденог тока, канала или путева и пруга [3]. Дистрибутивни гасовод се полаже у канал, под условом да се канал природно проветрава или да се простор око полиетиленске цеви потпуно испуни песком, односно постави у заштитну цев која мора да буде озрачена. Цевни спојеви дистрибутивног гасовода се по правилу изводе заваривањем. Код ових цевовода на дубини од 30 до 50cm изнад горње ивице цевовода поставља се упозоравајућа трака жуте боје са одговарајућим упозорењима о гасоводу под притиском [23].

Без обзира на локацију полагања гасоводних цеви оне се затрпавају слојем песка од 10cm изнад цеви. Материјал и начин затрпавања преосталог дела рова зависи од места полагања цевовода (зелена површина, тротоар и др.) као и од техничких и других услова [18]. Трака упозорења жуте боје са ознаком „опасност гасовод“ поставља се на дубину од 30cm од коте нивелете терена (Слика 2.18, лево). Након затрпавања рова гасоводне мреже, на површини земљишта (изнад вода) поставља се месингана плочица са натписом „гасовод“ (Слика 2.18, десно).



Слика 2.18 Скица подземне гасоводне цеви са траком за упозорење (лево) и одговарајуће надземне ознаке (десно)

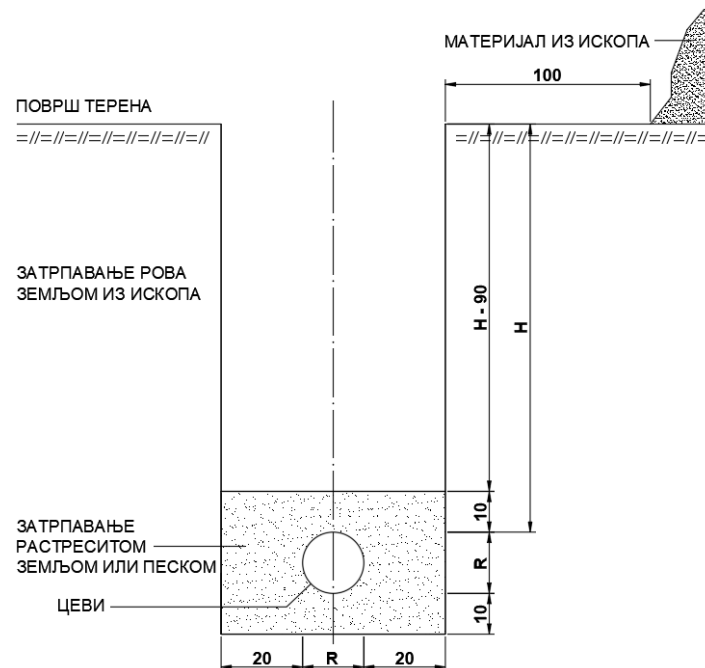
Ове ознаке се постављају на сва чворна места, темена, укрштања као и на сваких $50m$ код дела трасе на правцу. На деловима укрштања гасовода са путем и пругом гасовод се поставља у заштитну цев (Слика 2.19). У овом случају одушне цеви/затварачи постављају се са обе стране пута/пруге.



Слика 2.19 Укрштање гасовода са путем (а) и пругом (б, ц)

При пројектовању нафтовода мора се узети у обзир прописана густина насељености по јединици заштитног појаса цевовода на коме ће они бити изграђени. Ширина рова зависи од димензија цеви, при чему се са сваке

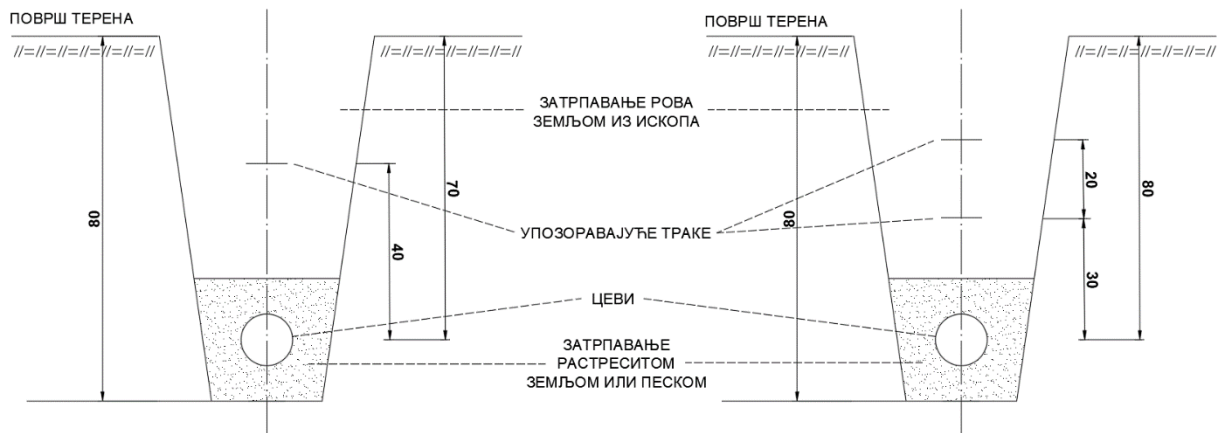
стране додаје по минимум 20cm од ивице рова (Слика 2.20). Затрпавање рова врши се песком 10cm изнад темена цеви, затим земљом из ископа, ако то технички услови дозвољавају [18].



Слика 2.20 Попречни пресек рова са гасоводном или нафтоводном цеви

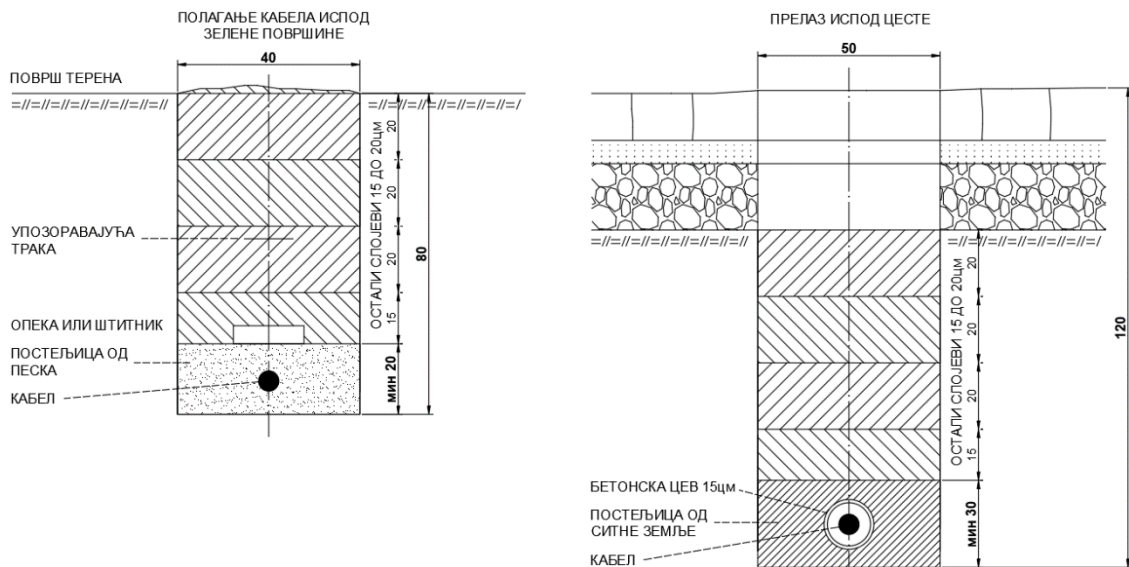
Нафтовод се дуж трасе обележава таблом упозорења на стубу прописаног облика и величине, који се постављају на међусобном растојању од $50 - 100\text{m}$. Упозоравајуће траке (црвене боје) постављају се дуж нафтоводних рова на дубини од минимум 30cm . Прелаз нафтовода преко или испод пруге, пута, реке и слично врши се помоћу специјалних заштитних цеви. На сваких $10-15\text{km}$ дуж трасе нафтовода постављају се вентили ради спречавања губитака у случају оштећења цевовода.

Електроенергетски водови. Ако се у исти ров полажу каблови различитих напона између њих се поставља опека, тако да је њихово међусобно растојање најмање 20cm . Уколико се у земљу полажу каблови високог напона онда се преко њих ставља слој песка и ред опеке. Водови напона преко 400kV , 380kV и 220kV постављају се искључиво надземно, најмање 7m изнад терена. Ради спречавања напрезања и оптерећења спојница каблови се у ров полажу кривудава, док се за случај преласка испод улице користе бетонски елементи (са отворима за жице) или пластичне цеви пречника 10cm , одговарајуће дужине. Међутим, због лошег хлађења каблова потребно је избегавати полагање каблова у бетонске елементе. Дуж кабловских подземних водова постављају се шахтови на растојању од око 40m . Поред шахтова, изнад вода постављају се и траке са упозорењем. Препорука за постављање ових трака на регулисаним површинама је 0.4m изнад вода, док се код нерегулисаних површина постављају две упозоравајуће траке на 0.3m и 0.5m изнад вода (Слика 2.21).



Слика 2.21 Полагање електроенергетских каблова са тракама за упозорење

На местима рачвања телекомуникационих каблова као и на преломима праваца израђују се кабловска окна. Међусобно растојање између два суседна окна не би смело да буде веће од $80m$. Између два окна, каблови се полажу без промене правца. Ако се каблови постављају у претходно ископане ровове око њих се поставља слој ситне земље без камења или песак, а изнад кабла се као заштита поставља ред опеке [22] (Слика 2.22).



Слика 2.22 Профили ровова за постављање телекомуникационих каблова

Ров у који се полажу каблови увек се копа као отворени ров, са изузетком испод жељезничке пруге, коловоза важнијег значаја и слично, где се изводе тунели. Каблови у рову се обележавају оловним објумицама (на сваких $5m$) на којима је утиснут тип, пресек, напон кабла, година полагања и број кабловског протокола. У случају да се ТТ каблови постављају изнад земље најмања дозвољена висина кабла изнад терена је $3m$, односно $6m$ када се прелази преко саобраћајница. Код стамбених објеката, каблови се постављају на растојању од $3m$ од објеката, на супротној страни улице у односу на електричне инсталације.

2.3.2 Дубине полагања подземних вода

Подземни водови се постављају на различитим дубинама које примарно зависе од пречника цеви. Цеви већег пречника постављају се на већу дубину док се цеви/каблови мањих пречника полажу на мању дубину (Табела 2.2, Табела 2.3). Испод зоне замрзавања полажу се водовод, канализација и гасовод (кондензат).

У Табели 2.2 приказане су вредности минималне дубине укопавања појединих подземних вода.

Табела 2.2 Минималне дубине укопавања вода

Врста вода	Минимална дубина [m]
Електрични каблови ниског напона	0.6 - 0.8
Електрични каблови средњег напона	0.8 - 1.0
Електрични каблови високог напона	1.0 - 1.2
Телефонски каблови	0.4 - 0.8
Оптички каблови	0.6 - 1.0
Гасовод	1.0 - 1.5
Топловод	0.5 - 1.5
Водовод	1.4 - 1.8
Канализација	1.4 - 2.0
Нафтовод	1.0

Карактеристике појединих подземних вода приказане су у Табели 2.3.

Табела 2.3 Основне карактеристике цевовода

Врста вода	Подела мреже	Пречник цеви ДН [mm]	Материјал вода	Дубина укопавања [m]	Ознака вода
Водовод	Напојни водови	300 - 700	Пластика, челик, бакар, ливено гвожђе	1.5 - 3.3	Плава боја, ознака В, број зоне, врста материјала, пречник у mm
	Разводни водови	100 - 250		1.2 - 1.8	
	Прикључна мрежа	75		0.8 - 1.2	
Канализација	Главни колектори	700 - 1300	Ливено гвожђе, бетон, керамика, пластика	до 8m	Сепија, ознака система, врста материјала и дим. галерије и канала, пречник цеви у mm
	Улични колектори	250 - 600		до 4m	
	Прикључна мрежа	60 - 200		0.8 - 3.5	
Топловод	Разводна мрежа	150 - 600	Челик	0.8 - 1.5	Наранџаста, ознака ТО,

	Прикључна мрежа	25 - 125		0.5 - 0.8	материјал, број цеви истог пречника, пречник у <i>mm</i>
Гасовод	Високог притиска		Челик у заштитној цеви	1 - 1.5	Зелена, број цеви, ознака Г, врста материјала, пречник у <i>mm</i>
	Средњег притиска			0.8 - 1.5	
	Ниског притиска		Пластика	0.5 - 0.8	
Дренажни систем	Хоризонтални	50 - 500	Керамика, пластика,	0.4 - 1.8	Ознака Д, пречник цеви
	Вертикални	250 - 800	Метал, азбест-цемент, армирани бетон	≈ 0 - 60	

Карактеристике појединих врста каблова приказане су у Табели 2.4.

Табела 2.4 Основне карактеристике каблова електроенергетске и ТТ мреже

<i>Врста вода</i>	<i>Подела мреже</i>	<i>Напон каблова</i>	<i>Материјал</i>	<i>Дубина укопавања [m]</i>	<i>Ознака вода</i>
Електроенергетски кабел	Високи напон	до 220kV	Бакарни каблови често постављени у заштитној цеви	1.2	Црвена, број каблова истог напона, ознака Е, вредност напона у <i>kV</i>
	Средњи напон	10-35kV		0.8 - 1	
	Ниски напон	220V или 380V		0.6 - 0.8	
Телекомуникациони кабел	Жични		Бакарни или оптички каблови у заштитној цеви (бетон, челик или ПВЦ)	0.6	Љубичаста, број каблова исте врсте, ознака ТТА за армиране каблове, ТТО за оптичке каблове
	Бежични				

2.3.3 Просторни распоред подземних водова

Добро организован и усаглашен просторни распоред водова значајан је са аспекта бољег одржавања водова, бржег и једноставнијег отклањања кварова и оштећења. Познавање основних концепата елемената трасе знатно олакшава брзо проналажење подземних водова, посебно у урбаним срединама. Положај водова карактеришу следећи елементи [19]:

- хоризонтална удаљеност од регулационе линије¹¹,
- дубина вода, кота темена вода и кота терена и
- међусобни размак водова.

Поред тога, елементи трасе се утврђују и на основу теренских, хидролошких, климатских и других прилика. Такође, прелазак преко саобраћајница, водених површина, као и укрштање водова захтева посебна техничка решења. Секундарни водови смештају се ближе објектима за разлику од примарних који се постављају даље од објеката. Пешачка стаза у складу са наведеним правилима може да се подели у неколико карактеристичних зона (Слика 2.23).

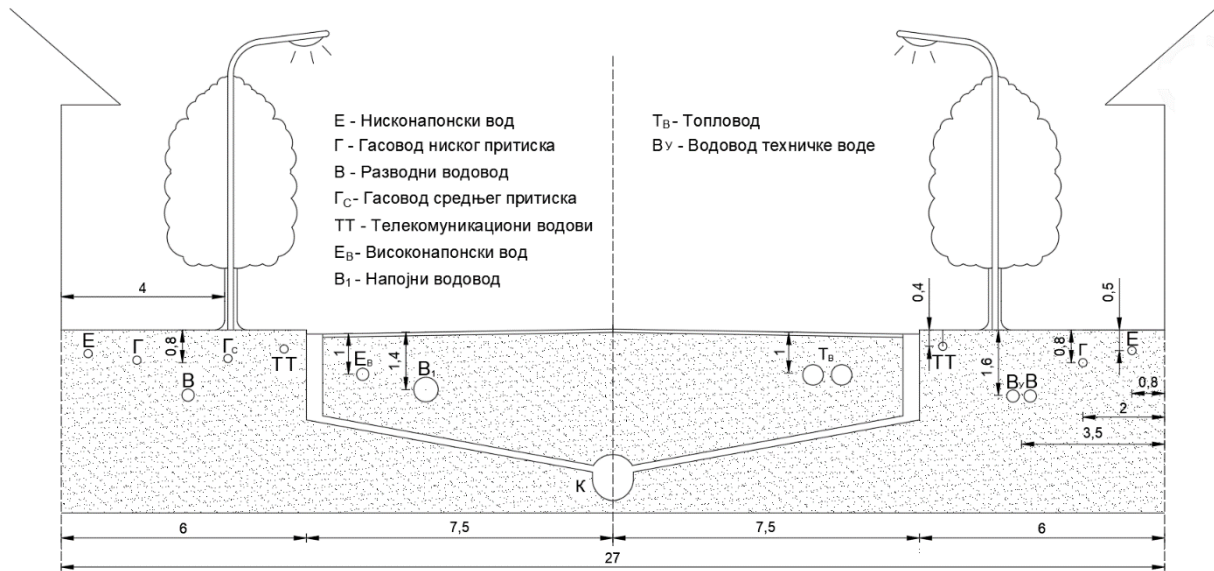


Слика 2.23 Подела пешачке стазе на зоне [24]

¹¹ **Регулациона линија** - линија разграничења парцела за грађење објеката од општег интереса од парцела које имају другу намену.

У зависности од габарита улице, постоји различита диспозиција подземних водова:

- Улица у приградском насељу ширине 27m (у попречном профилу) од једне до друге регулационе линије (Слика 2.24) и
- Улица у сеоским пределима ширине 17m (у попречном профилу) од једне до друге регулационе линије (Слика 2.25)



Слика 2.24 Диспозиција објеката (2) – Улица ширине 27m

Опште правило је да се сви водови постављају паралелно са осом улице или са регулационом линијом.



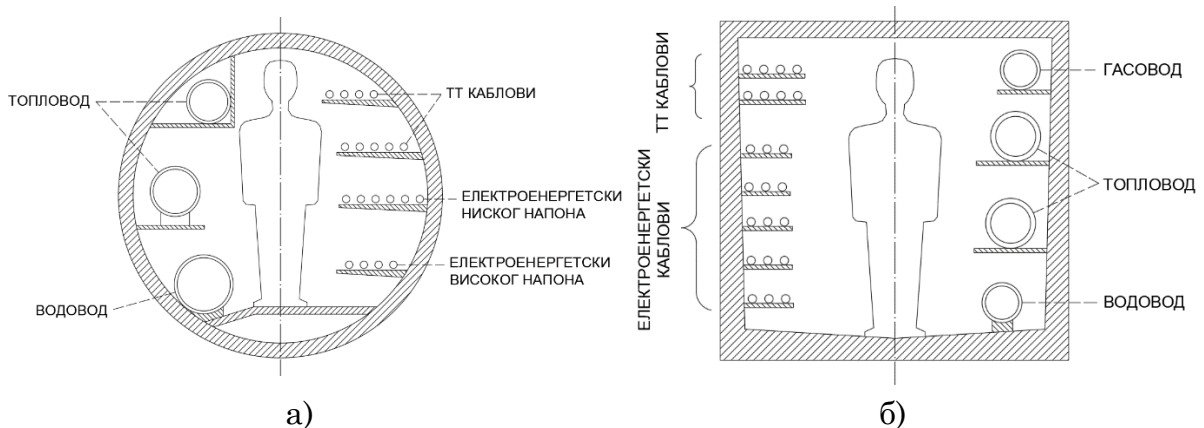
Слика 2.25 Диспозиција објеката (1) – Улица ширине 17m

Последњих година све чешће се граде колектори у које се постављају сви водови осим канализације и дренажних водова. Колектори обезбеђују добар прилаз, брже и лакше уочавање кварова и оштећења као и њихову једноставнију санацију и евиденцију (Слика 2.26).



Слика 2.26 Пример водова смештених у подземни колектор

Колектори се граде у облику кружног или правоугаоног попречног пресека (Слика 2.27). Димензије колектора треба да обезбеде несметано кретање човека и приступ сваком воду који се налази унутар колектора.



Слика 2.27 Попречни пресек колектора за смештај подземних водова

У Табели 2.5 приказане су вредности минималних дозвољених хоризонталних растојања подземних гасовода од стамбених објеката (од ближе ивице цеви до темеља објекта) [23].

Табела 2.5 Минимална хоризонтална растојања водова од стамбених објеката

Врста вода	$MOP \leq 4bar$ [m]	$4bar < MOP \leq 10bar$ [m]	$10bar < MOP \leq 16bar$ [m]
Гасовод од челичних цеви	1	2	3
Гасовод од ПЕ цеви	1	3	-

2.3.4 Међусобно усаглашавање водова

Водови морају да се полажу тако да не ометају рад и не оштећују суседне водове или помоћне уређаје. Ово нарочито важи код места укрштања водова или код паралелних водова. Како не би дошло до оштећења постојећих цеви и каблова постоје правила која треба примењивати приликом полагања нових цевовода/каблова.

У фази планирања и пројектовања подземних водова потребно је водити рачуна о минималним хоризонталним размацама између водова који су међусобно паралелни (Табела 2.6).

Табела 2.6 Минимални хоризонтални размаци између паралелних водова

<i>Врста водова</i>		<i>Мин. хоризонтално растојање [m]</i>
<i>Телекомуникациони</i>	Електрични кабел високог напона	1.0
<i>Телекомуникациони</i>	Електрични кабел ниског напона	0.5
<i>Телекомуникациони</i>	Водовод	0.8 - 1.0
<i>Телекомуникациони</i>	Топловод	2.0
<i>Телекомуникациони</i>	Гасовод	1.0 - 2.5
<i>Водовод</i>	Електрични кабел високог напона	0.8
<i>Водовод</i>	Електрични кабел ниског напона	0.5
<i>Водовод</i>	Канализација	1.0 - 1.5
<i>Водовод</i>	Гасовод	0.5 - 1.0
<i>Гасовод</i>	Канализација	1.0 - 3.0
<i>Топловод</i>	Електрични кабел високог напона	1.5 - 2.0

У случају укрштања гасовода и канализације, гасовод се по правилу поставља изнад канализације. Уколико се мора поставити испод, неопходно је применити додатне мере заштите ради спречавања евентуалног продора гаса у канализацију [23]. При паралелном вођењу дистрибутивног гасовода са подземним водовима минимално растојање износи 40cm, а у изузетним случајевима може бити најмање 20cm. Укрштање дистрибутивног гасовода са саобраћајницама врши се полагањем гасовода у заштитну цев, односно канал [3].

Ако се у исти ров полажу каблови различитог напона њихова удаљеност мора бити најмање 0.2m, јер се између њих поставља опека. За случај подземног полагања каблова високог напона онда се преко њих ставља слој ситног песка а затим ред опеке. На местима провођења кабла испод улице најчешће се

користе бетонски елементи са отворима за каблове, који се полажу у ров [19]. Наведена правила у пракси нису увек примењива у потпуности, из више разлога:

- Нису познате информације о свим постојећим водовима у зони од интереса,
- Економски разлози,
- Велика густина подземних инсталација,
- Слична дубина укопавања различитих врста водова,
- Вештачке или природне препреке и друго.

Због недовољног поштовања наведених правила и недовољно ажурне евиденције о подземним водовима, неретко долази до мањих или већих оштећења подземних водова. Оштећења подземних водова најчешће настају током земљаних радова приликом изградње већих инфраструктурних објеката или реконструкцијом и уређењем постојеће инфраструктуре. Да би се оштећења свела на минимум неопходно је креирати квалитетне геодетске подлоге о постојећим подземним водовима и извршити геодетско снимање сваког новог вода, пре њиховог затрпавања.

У циљу детекције постојећих водова могу се користити два основна приступа:

- 1) Детекција постојећих водова откопавањем (ревизиони ров и слично) и
- 2) Детекција постојећих водова применом неке од неинвазивних технологија детекције.

Наведени приступи имају своје предности и мане од којих су најважније приказане у Табели 2.7. Анализирајући наведене особине долази се до закључка да се неинвазивним технологијама детекције даје предност у односу на директно откопавање.

Табела 2.7 Предности и мане детекције ОПИ откопавањем у поређењу са неинвазивном детекцијом

<i>Детекција постојећих водова откопавањем</i>	
<i>Предности</i>	<i>Мане</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Дубина и радијус откопаних водова може директно да се измери - Откопани водови могу тачно да се геореференцирају (накнадним мерењима) - Материјал цеви се може директно одредити 	<ul style="list-style-type: none"> - Скупо извођење земљаних радова - Могућност оштећења постојећих водова - Блокирање саобраћаја у временском распону од неколико сати до неколико дана - Велик утрошак времена - Висок проценат могућности да се велик број подземних водова не региструје (земљани радови извршени у непосредној близини тражених водова или до недовољне дубине)
<i>Неинвазивна детекција постојећих водова</i>	
<i>Предности</i>	<i>Мане</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Безбедност људи (радника и пролазника) - Детекција водова без претераног ометања саобраћаја (до неколико минута) - Минимална оштећења постојећих површина на терену и ОПИ - Осим опреме и обученог оператера нема додатних трошкова (земљани радови и слично) - Не може доћи до оштећења постојећих водова - Нема негативног утицаја на постојеће водове - Мањи утрошак времена 	<ul style="list-style-type: none"> - Потребна је обука за квалитетно тумачење резултата детекције (могућност детекције и других објеката који нису цевоводи: корење, шут, камење, опека...) - Отежано тачно одређивање радијуса

2.4 Резиме поглавља

У уводном делу другог поглавља дисертације наведени су објекти подземне инфраструктуре које је изградио човек. Као посебан сегмент ових објеката, према закону о државном премеру и катастру и уписима права на непокретности, издвојени су подземни водови који су детаљније анализирани кроз целокупно друго поглавље.

У првом делу овог поглавља, подземни водови су груписани у две категорије: цевоводи и каблови, и као две одвојене целине анализирани у наставку поглавља.

За цевоводе је извршена подела према неколико критеријума, од којих се издвајају: подела према врсти материјала од кога су изграђени и подела према намени (водовод, канализација, топловод, гасовод, нафтовод и дренажни системи). Сваки вод класификован према намени засебно је анализиран наглашавајући саставне елементе, основне карактеристике и његове специфичности. Поред ове поделе табеларно су приказани су и стандардни пречници цеви (унутрашњи, спољни), дебљина зида и изолације који се најчешће користе у пракси.

Каблови су према намени класификовани у две основне групе (електроенергетска и телекомуникациона мрежа). Ове две мреже су детаљније анализирани наглашавајући саставне елементе, додатне поделе, карактеристике и друге специфичности сваке од њих.

У другом делу овог поглавља, наводе се опште одредбе и правила полагања подземних водова ослањајући се на постојеће стандарде, законе и прописе. Овај део обухвата и табеларне приказе са минималним дубинама укопавања појединачних водова, као и основне карактеристике цевовода и каблова.

У завршном делу поглавља анализиран је просторни распоред подземних водова као и међусобно усаглашавање водова. На самом крају сумарно су наведене предности и мане детекције ОПИ откопавањем у односу на њихову неинвазивну детекцију.

3. Геофизичке методе за детекцију ОПИ

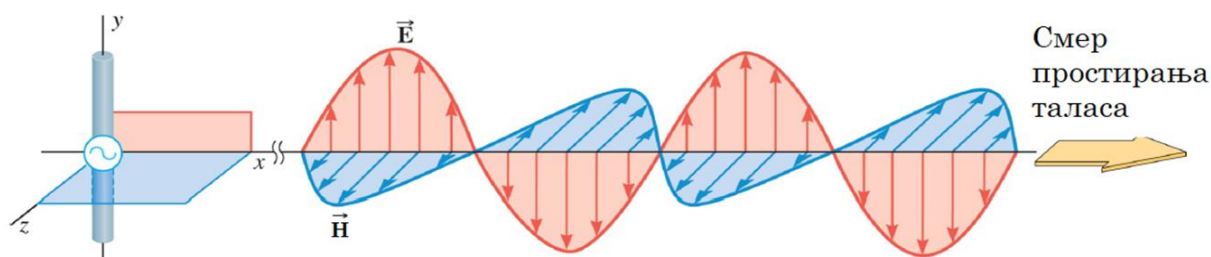
Геофизичке методе које се примењују за детекцију ОПИ омогућују лоцирање, дефинисање геометрије и категоризацију ОПИ мерењем одговарајућих физичких, електричних и хемијских особина подповршинских слојева земљишта [25]. Принцип рада наведених геофизичких метода заснива се на интераговању емитованих и/или природних сигнала и/или поља са физичким својствима подповршинског састава земљишта (стене, шупљине, подземне воде, ОПИ). Основна подела ових метода је на пасивне и активне. Пасивне методе откривају промене у структури подповршинских слојева на основу локализованих аномалија које се јављају у природном гравитационом и магнетном пољу Земље. Насупрот томе, код активних метода генеришу се сигнали који се преносе у подповршинске слојеве и прати њихова промена између тренутка емитовања, проласка кроз земљу и регистрације на површини. На основу записа регистрованих сигнала врши се одговарајућа обрада, визуелизација и интерпретација добијених резултата геофизичке анализе. Постоји неколико активних метода неинвазивне детекције које се могу користити за детекцију подземних водова и других ОПИ. Генерално, ове методе се према извору таласа кога користе за детекције могу поделити у неколико група [26]:

- а) Ултразвучне (сеизмичке)
- б) Електричне
- в) Магнетне - мерење потенцијала магнетног поља
- д) Електромагнетне (ЕМ)
- г) Комбиноване методе

Истраживање у оквиру ове дисертације спада у групу ЕМ метода, стога се у наставку наводи детаљнија подела метода за детекцију ОПИ из ове групе.

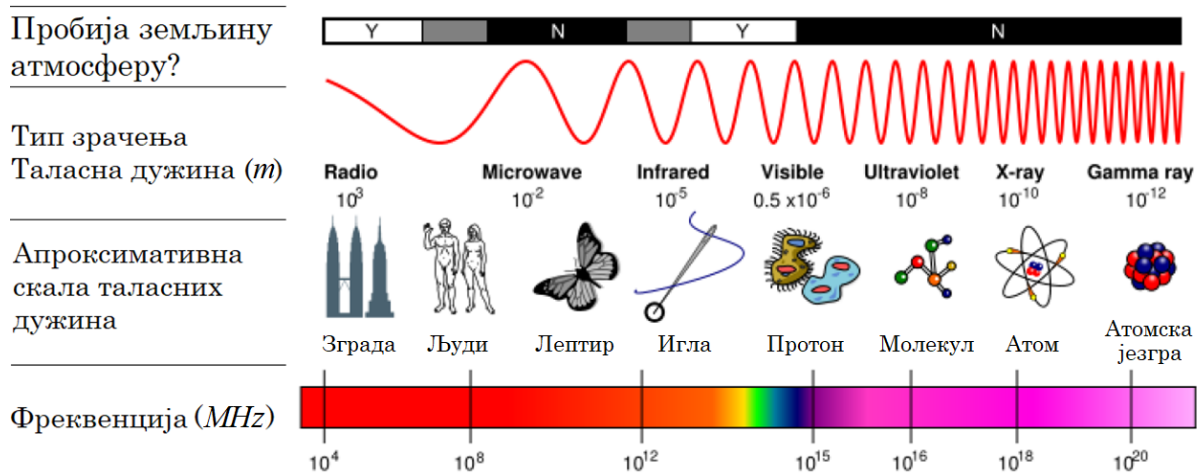
3.1 Електромагнетне методе

Код електромагнетних метода за детекцију ОПИ као активан сигнал-носиоц информација се користи електромагнетни (ЕМ) талас. ЕМ талас се састоји од електричне и магнетне компоненте, чије су равни простирања међусобно управне (Слика 3.1).



Слика 3.1 Принцип простирања електромагнетних таласа

Таласи у електромагнетном спектру варирају у величини од дугих радио таласа (величине објеката/зграда) до врло кратких гама-зрака, који су мањи од величине језгра атома (Слика 3.2).



Слика 3.2 Спектар електромагнетних таласа

За разлику од брзине простирања електромагнетних таласа у вакууму када се крећу брзином светлости (без обзира на таласну дужину), брзина простирања ЕМ таласа у подповршинским слојевима земљишта је значајно мања (Израз 3.5) што је узроковано променом структуре медијума и дела ЕМ спектра.

Основна подела електромагнетних метода је на активне и пасивне методе. Аудиомагнетометар је из групе пасивних метода, док у групу активних метода спадају:

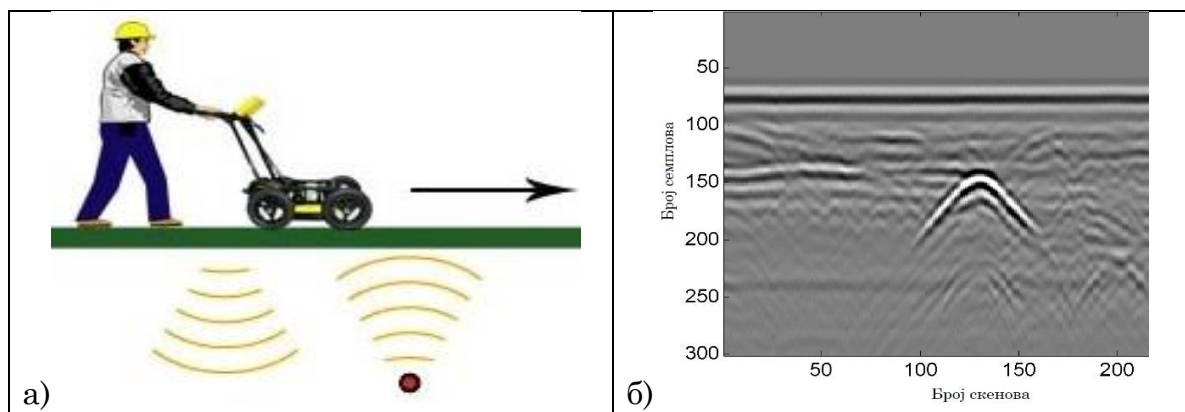
- ЕМ профилисање на фиксној фреквенцији,
- ЕМ сондирање,
- ЕМ профилисање,
- Детекција на ниским фреквенцијама,
- Технологија скенирања георадаром.

У наредним подпоглављима детаљније је објашњена технологија скенирања георадаром, с обзиром да су подаци прикупљени наведеном технологијом скенирања у фокусу ове дисертације.

3.1.1 Технологија скенирања георадаром

Технологија скенирања георадаром (енг. *Ground Penetrating Radar, GPR*), једна је од најзначајнијих неинвазивних метода која се користи за детекцију и категоризацију ОПИ [27]. Кроз анализу података високе резолуције може се извршити локализација ОПИ (положај, дубина), дефинисање геометрије ОПИ (пречник, димензије), карактеристике ОПИ (материјал, стање) као и промене у структури земљишта, чак и када је повећан утицај шума [28]–[30]. Ова технологија скенирања применљива је за урбане зоне са нехомогеним саставом земљишта, великом густином ОПИ, омогућава детекцију и

неметалних водова. Шематски приказ георадара и општи изглед резултата аквизиције приказани су на Слици 3.3а и 3.3б, респективно.



Слика 3.3 Георадар (а) и општи изглед резултата аквизиције (б)

Аквизиција података који се користе за обраду у оквиру ове дисертације врши се применом георадара из групе импулсних радара. Поред импулсних постоје и георадари са континуалним сигналом и променљивом фреквенцијом, али су они у фази експерименталних истраживања. Поред детекције подземних водова (цевовода и каблова) георадар проналази примену и у следећим областима:

а) Грађевинарство [31]

- Анализа стања путева, писти, тротоара,
- Анализа стања железничког насипа,
- Инспекција бетонских конструкција (положај, присуство и карактеристике арматуре, пукотине и слично),
- Скенирање раскрснице или трга,
- Скенирање комплетног фабричког круга.

б) Анализа карактеристика земљишта

- Лоцирање подземних резервоара и детекција цурења,
- Детекција нивоа подземних вода,
- Детекција клизишта,
- Естимација дебљине наслага муља у рекама, каналима и језерима,
- Естимација дубине литолошких слојева (за потребе комасације),
- Естимација запреминског удела влаге у земљишту (хидролошке карактеристике).

ц) Остале области примене

- Детекција затрпаних објеката (шахтова, бунара, тунела, пролаза, метроа),
- Археологија,
- Форензика,
- Детекција минско експлозивних средстава,
- Геолошка испитивања тла (структура стена и земљишта) и слично

3.1.1.1 Функционалне целине

Основне хардверске целине георадара су:

- Управљачка јединица са оперативним системом,
- Антена (пријемни и предајни део),
- Батеријско напајање и
- Кабел за повезивање управљачке јединице и антене (случај жичне комуникације).

У додатне хардверске елементе убрајају се:

- Покретно возило опремљено инкременталним енкодером,
- Кориснички маркер,
- ГНСС (енг. *Global Navigation Satellite System - GNSS*) ровер.

У наставку је детаљније објашњен сваки од наведених хардверских елемената.

Управљачка јединица

Преко управљачке јединице оператер врши сва подешавања која ће фигурирати у процесу аквизиције. Оператер на екрану види резултат скенирања у реалном времену, али може и да прегледа податке који су од раније сачувани на меморијску картицу управљачке јединице. Постоје различите верзије и модели управљачких јединица. За аквизицију података у оквиру ове дисертације коришћен је модел *SIR3000* (Слика 3.4). Треба нагласити да је управљачка јединица у основи рачунар, тако да се резултати скенирања архивирају у дигиталном облику.



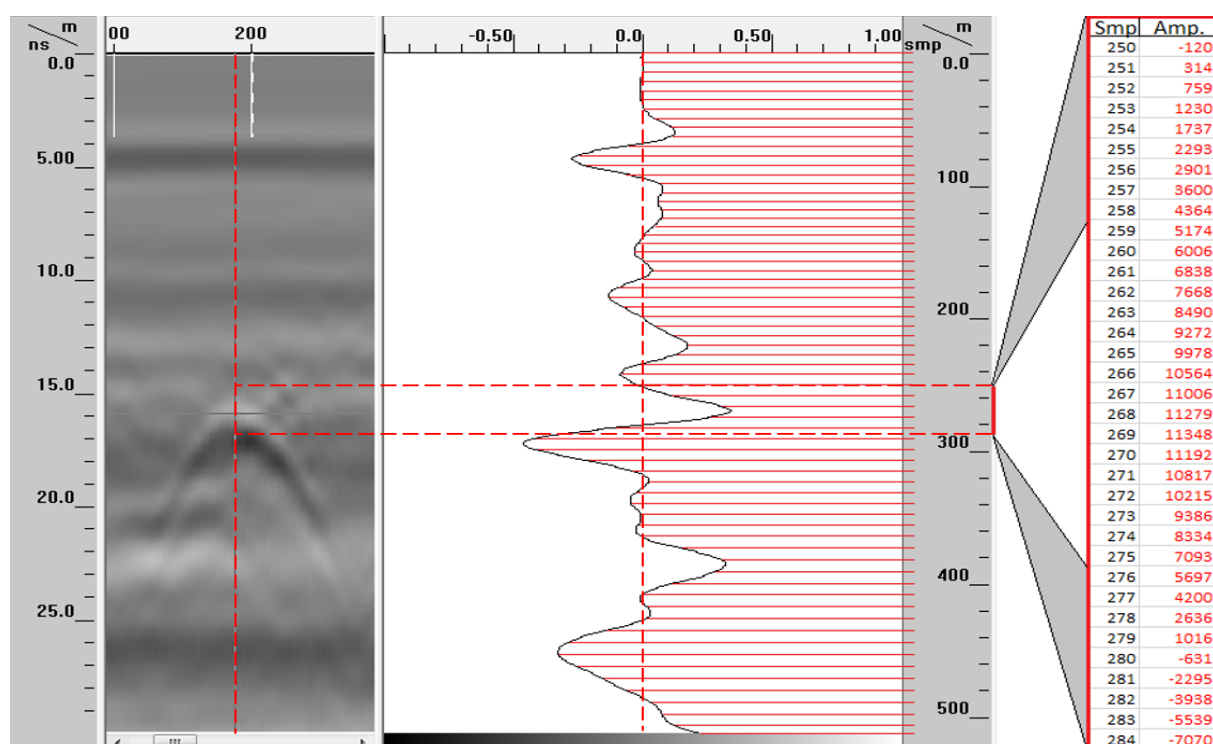
Слика 3.4 Управљачка јединица, модел “SIR3000”¹²

Аналогни сигнал из временског домена неопходно је претворити у дигитални облик, како би се на адекватан начин приказао у управљачкој јединици. Ово се постиже аналогно/дигиталном (А/Д) конверзијом.

¹² <https://www.allied-associates.com/solutions/sir3000/>, [датум приступа: 29.05.2020.]

Аналого/дигитална конверзија

Аналого/дигитална (А/Д) конверзија има задатак да од континуалног сигнала у времену образује дискретан сигнал са коначним бројем читавања амплитуде (одбирака) (Слика 3.5). Резултат скенирања са једне позиције антене дели се на неколико једнаких одбирака за које се врши читавање амплитуде. Имајући у виду да је дубина скенирања ОПИ (који су у фокусу ове дисертације) свега до неколико метара (Табела 3.2) 512 одбирака ће у већини случајева дати добру репрезентацију улазних података за даљу обраду. Ово значи да уколико се скенирање врши до дубине од 5m, са параметром од 512 одбирака региструје се амплитуда на сваких $\approx 1\text{cm}$ ($5\text{m}/512$). Типичне вредности одбирака које се користе приликом скенирања георадаром су: 256, 512, 1024 или 2048.

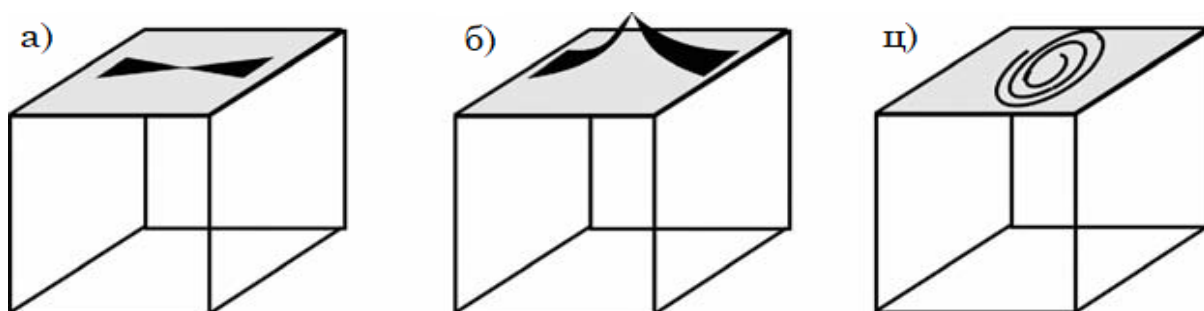


Слика 3.5 Принцип аналого дигиталне (А/Д) конверзије

У софтверима за обраду података креираних применом георадара, амплитуда сигнала са једне позиције може се приказати и у осцилоскопском приказу (у форми приказа континуалног сигнала, формираног на основу коначног скупа записаних одбирака). На овај начин амплитуда се најчешће приказује нормализованим вредностима са оба предзнака. Уколико се користе сирови (необрађени) подаци они се могу анализирати и са изворним вредностима амплитуде, као што је случај при анализама спроведеним у оквиру ове дисертације. На Сlici 3.5 приказане су изворне вредности амплитуде од 250-те до 284 врсте (одбирка). На основу ових вредности јасније се уочавају разлике у вредностима амплитуде сигнала. Због даљих анализа важно је уочити да се максимална вредност амплитуде за овај узорак налази у 269-ом одбирку.

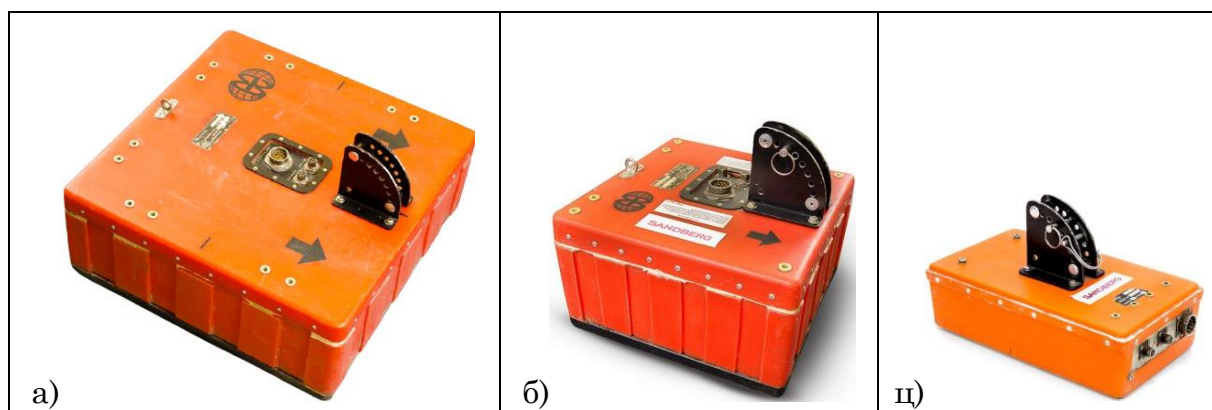
Анテナ

Поред управљачке јединице антена представља најважнију компоненту георадара. Антене се дизајнирају тако да оптимизују карактеристике ЕМ таласа који се емитује у земљиште. Антена георадара састоји се од предајног и пријемног дела, који су смештени у исто кућиште. Предајна антена има задатак да емитује ЕМ таласе у земљиште, док пријемни део антене региструје део ЕМ таласа који се одбија од препрека на које наилази приликом проласка кроз земљиште. Када су пријемни и предајни део антене одвојени тада се ради о бистатичким антенама, у супротном ради се о моностатичким антенама. Поред наведене поделе антена се разликују и према начину поларизације ЕМ таласа. Према овом критеријуму разликују се линеарно и кружно поларизован ЕМ талас. Линеарно поларизован ЕМ талас је код диполних и хорн антена (Слика 3.6а и 3.6б), док се у трећој групи налазе антене са кружном (спиралном) поларизацијом (Слика 3.6ц). Линеарне диполне антене су често коришћене код георадара. Међу диполним антенама најпопуларнији је дизајн дипола у облику „лептир машине“ [32].



Слика 3.6 Линеарна диполна антена (а), линеарна хорн (б) и спирална антена (ц)

Импулсни георадар користи антене широког фреквенцијског опсега од 10MHz до 5GHz [27]. Ако се посматра електромагнетни спектар (Слика 3.2) може се уочити да су фреквенције таласа које се користе код георадара из опсега који припада микроталасима (*Microwave*). У оквиру истраживачких активности ове дисертације коришћене су линеарне диполне антена са три различите централне (носеће) фреквенције, и то: 200MHz , 400MHz и 900MHz (Слика 3.7).



Слика 3.7 Антене централних фреквенција 900MHz (а), 400MHz (б) и 200MHz (ц)

Од централне фреквенције антене зависи и величина објекта који се може детектовати. Зато је једна од најважнијих ставки у раду са георадаром правилан одабир одговарајуће централне фреквенције антене. Наведена зависност може се изразити преко израза за прорачун таласне дужине електромагнетног таласа (3.1).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.1)$$

Где је:

- λ - таласна дужина ЕМ таласа,
- v - брзина простирања ЕМ таласа и
- f - фреквенција антене.

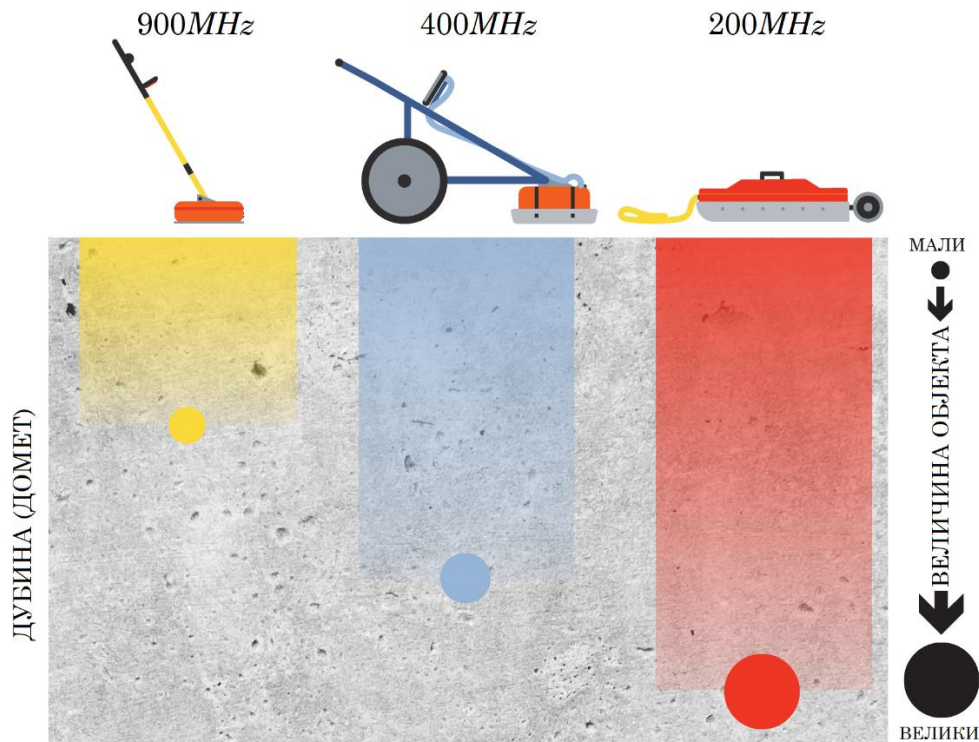
Проласком електромагнетних таласа кроз земљиште амплитуда сигнала слаби, таласа дужина електромагнетног таласа се повећава, те је у најбољем случају могуће детектовати објекат који је једнак четвртини таласне дужине централне фреквенције антене (3.2).

$$\delta = \frac{\lambda}{4} \quad (3.2)$$

Где је:

- δ - детектабилност (величина ОПИ који је могуће детектовати)

Антиена веће централне фреквенције има мању таласну дужину што значи да може да региструје објекте мањих димензија, али је слабљење таквог сигнала експоненцијално (Слика 3.8).



Слика 3.8 Детектабилност и домет у зависности од фреквенције антене

Поред фреквенције антене, проценат влаге и хетерогеност земљишта има значајан утицај на максималан домет простирања ЕМ таласа.

Домет скенирања могуће је израчунати преко следећег израза:

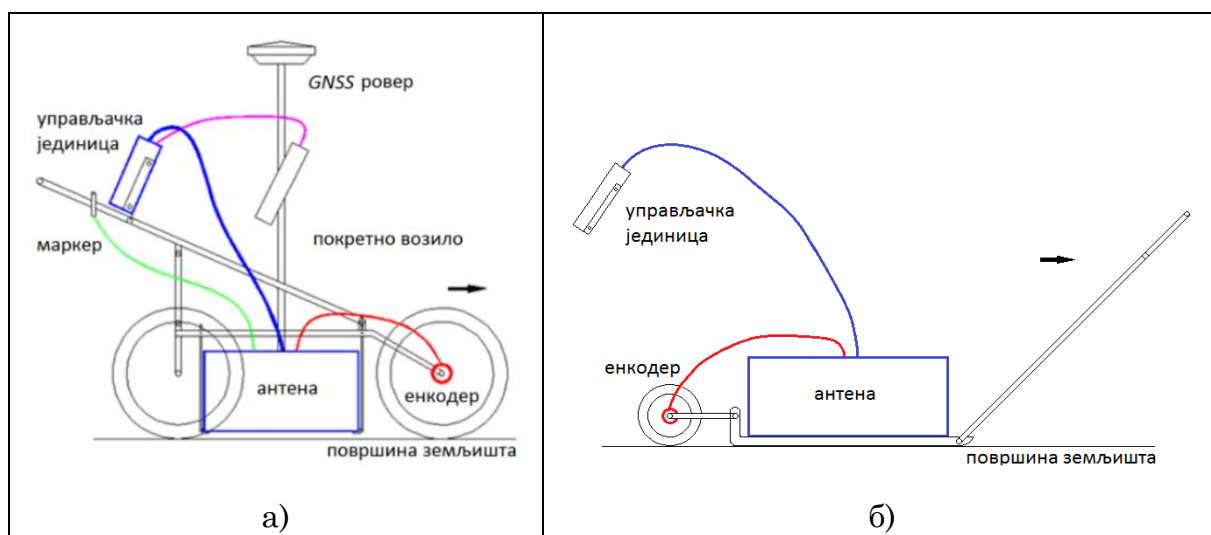
$$s = \frac{\vartheta \cdot t}{2} \quad (3.3)$$

Уврштавањем просечне вредности брзине [cm/ns] и очекиване вредности простирања ЕМ таласа [ns] могуће је одредити вредност домета у метрима. Карактеристичне вредности домета и најмањег пречника вода који се може детектовати за типичне фреквенције антена (које се користе у оквиру практичног дела дисертације) приказане су у Табели 3.1.

Табела 3.1 Карактеристике антена различитих централних фреквенција [33]

Фреквенција антене [MHz]	Типична вр. range [ns]	Домет [m]	Карактеристична област примене
200	70 - 300	6.5	Геологија
400	20 - 100	3.5	Археологија, водови, блиско-површинска геологија
900	10 - 20	1.0	Асфалт, археологија, састав земљишта, водови

Кретање антене код импулсног георадара остварује се гурањем (*push*, Слика 3.9а) или вучењем (*pull*, Слика 3.9б), што примарно зависи од стања површине по којој се врши скенирање.



Слика 3.9 Импулсни GPR систем са два режима кретања (*push*, *pull*)

Енкадер

Инкрементални енкадер (Слика 3.10) при скенирању георадаром обезбеђује тачно позиционирање центра антене изнад осе посматраног објекта

(релативно позиционирање). Ово позиционирање је могуће јер енкодер региструје кретање његове осовине у оба правца.



Слика 3.10 Изглед инкременталног енкодера

Применом енкодера, позицију детектованог објекта при скенирању георадаром могуће је одредити директно на терену, релативним геореференцирањем. За тачно позиционирање неопходно је извршити калибрацију енкодера. Поступак калибрације подразумева да се на терену измери одговарајуће растојање у метрима и та дужина се прескенира георадаром. Енкодер ће регистровати одређен број импулса на пређеном растојању које се преко управљачке јединице задаје у метрима, након чега се врши аутоматски прорачун броја импулса по дужном метру. На основу добијеног прорачуна свако наредно скенирање ће бити изражено у метрима.

Маркери

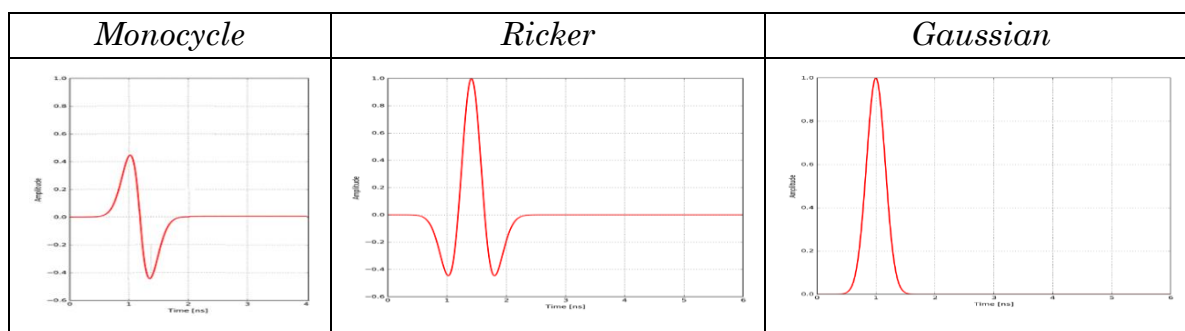
За обележавање карактеристичних сегмената у резултатима скенирања георадаром користи се маркер (Слика 3.9а). Ове ознаке се задају на произвољним локацијама од стране оператера и називају се кориснички маркери. Њима се најчешће обележавају места на којима долази до промене површине скенирања, затим прелази почетка/краја улице или тротоара или зона у којој се очекује објекат од интереса. У процесу накнадне обраде резултата скенирања ове информације могу бити од суштинске важности. Са друге стране, ако се резултат скенирања обрађује као слика, места са постављеним маркерима представљају једну врсту шума која нарушава конзистенцију радарграма [34] у виду испрекидане беле линије.

ГНСС

Апсолутно позиционирање радарграма у простору постиже се на основу пројекције просторних координата тачака дуж трасе скенирања на површину земљишта. Ово се обезбеђује користећи ГНСС ровер који се монтира изнад центра антене (Слика 3.9а). Код неких георадара ГНСС ровер може бити интегрисан заједно са антеном и управљачком јединицом, као саставни део опреме.

3.1.1.2 Принцип рада

Преко управљачке јединице оператер задаје брзину емитовања импулса које ће предајни део антене да емитује на одређеној фреквенцији и усмерава у земљиште. Високонапонски импулс ширине 1-5ns преноси се са генератора импулса на предајни део антене. Постоји неколико различитих облика емитованог импулса од којих се најчешће користе: *Monocycle*, *Ricker* и *Gaussian* (Слика 3.11).

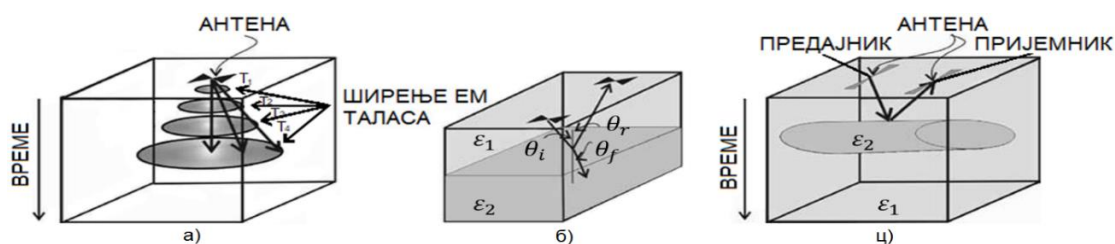


Слика 3.11 Примери емитованих импулса у временском домену са генератора импулса и предајног дела антене [35]

Емитовани импулс се након уласка у земљиште трансформише у равански поларизоване електромагнетне таласе високе фреквенције. У интеракцији са објектима и медијумом кроз који ЕМ талас пролази може доћи до неког од следећих ефеката:

- Одбијања (рефлексије),
- Преламања (рефракције),
- Дисперзије (распршивања) или
- Понављања (еха).

Код скенирања георадаром прва два ефекта су корисна, за разлику од друга два која представљају негативне ефекте. Приликом проласка кроз земљиште један део ЕМ таласа се одбија од граничних површи (објеката и слојева земљишта) на које талас наилази док други део ефектом преламања пролази до дубљих слојева земљишта (Слика 3.12). Овај процес се наставља све док слабљење сигнала не постане исувише велико. Узроци рефлексије од граничних површи последица су разлике у електричним и магнетним својствима материјала на граничним слојевима инфраструктурних објеката и слојева земљишта. Рефлектован сигнал се региструје пријемним делом антене.



Слика 3.12 Ефекат одбијања (ц) и преламања ЕМ таласа (б)

До негативног ефекта у облику распршивања ЕМ таласа долази приликом сусрета са „храпавим“ и неравним површинама које рефлектују ЕМ талас у свим правцима. Поред наведеног, негативан ефекат представља и ехо који представља поновљене рефлексије у радарграму узроковане вишеструко већом брзином простирања ЕМ таласа из предајног дела антене у односу на брзину кретања антене. Ехо се у највећој мери елиминише у процесу накнадне обраде радарграма. Како би се овај негативан ефекат у већој мери елиминисао током аквизиције, управљачка јединица врши оптимално појачање регистрованог рефлектованог сигнала, које је директно пропорционално са порастом дубине. Математички опис простирања ЕМ таласа кроз земљиште објашњен је у Поглављу 3.2.

3.1.1.3 Модови аквизиције

Подаци прикупљени технологијом скенирања георадаром дефинисани су функцијом просторне резолуције и амплитудом рефлектованог сигнала [36]. У складу са тим ови подаци задовољавају низ рефлектованих таласних форми f :

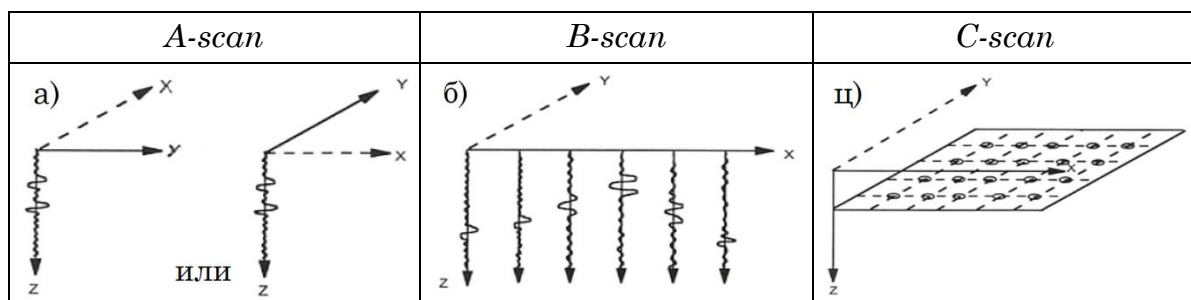
$$f(x, y, z) = A(x_i, y_j, z_k) \quad (3.4)$$

Где је:

$$i \in [1, M]; j \in [1, P]; k \in [1, N]$$

Аквизиција низа таласних форми може да се изврши на више начина (Слика 3.13):

- A-scan*: узорковање рефлексије са једне позиције антене (Слика 3.13а)
- B-scan*: узорковање низа рефлектованих сигнала (Слика 3.13б)
- C-scan*: захтева формирање 3Д модела (Слика 3.13ц)



Слика 3.13 Методе аквизиције георадаром

A-scan

Узорковање рефлексије ЕМ таласа са јединствене локације назива се *A-scan* (Слика 3.13а). Скенирање у оваквом режиму рада назива се (*Point mode*). Након узорковања рефлексије са почетне локације антена георадара се премести на следећу локацију и тако редом док се не изврши регистрација свих тачака од интереса. Овај мод скенирања користи се по неравном терену, када је континуално кретање антене непосредно изнад површине земљишта отежано или није могуће.

B-scan

У пракси се најчешће врши узорковање секвенцијалног низа рефлектованих сигнала (више узастопних *A-scan*-ова) дуж жељеног профила. На овај начин формира се радарграм (*B-scan*). Узорковање секвенцијалног низа рефлектованих сигнала могуће је извршити дуж праволинијске или криволинијске путање. Ако је неопходан тачан положај сваке узорковане рефлексије на криволинијској траси, потребно је регистровати 2Д координате на површини, што се најчешће постиже у синхронизованом премеру георадара и *GPS/GNSS* пријемника. Аквизиција секвенцијалног низа узоркованих рефлексија може да се врши са или без енкодера. Скенирање без енкодера врши се у једнаким временским интервалима (*Time mode*). То значи да је неопходно усклађивање дужине радарграма са стварном дужином трајекторије антене - свођењем на једнака растојања између суседних рефлексија. Из тог разлога је, код овог начина скенирања пожељно што је могуће уједначеније кретање антене током аквизиције како би подаци на радарграму били упоредиви. Узорковање секвенцијалног низа рефлектованих сигнала најчешће се врши у синхронизацији са енкодером. Овако креирани подаци имају униформан запис регистрованих објеката у радарграму. Из наведених разлога овај начин аквизиције се најчешће користи у пракси и представља основни улазни податак обраде у оквиру ове дисертације.

C-scan

Овај тип скенирања подразумева приказ интензитета рефлектованог сигнала са жељене дубине за целокупну површину од интереса. Како би ово било омогућено најчешће се врши скенирање правилне мреже радарграма (више паралелних траса *B-scan*-ова). Узорковани радарграми се зајенички процесирају и на тај начин формирају 3Д модел. Формирање 3Д модела могуће је на основу паралелних радарграма дуж једне или обе осе скенирања. У мрежи радарграма међупростор између суседних радарграма се формира на основу садржаја из свих суседних радарграма.

Најзначајнији параметар за формирање просторног радарграма је размак између 2Д профила [37]. Код мањег размака између суседних *B-scan*-ова просторни модел је сачињен са више оригиналних профила што резултира бољом интерпретацијом података. Са друге стране превелика густина *B-scan*-ова захтева већи временски период аквизиције. У пракси је увек потребно направити баланс између резолуције (густине и броја радарграма) и трошкова скенирања. Растојање између профила примарно зависи од следећих параметара:

- Очекиване величине тражених ОПИ,
- Њиховог међусобног растојања и
- Трага антене.

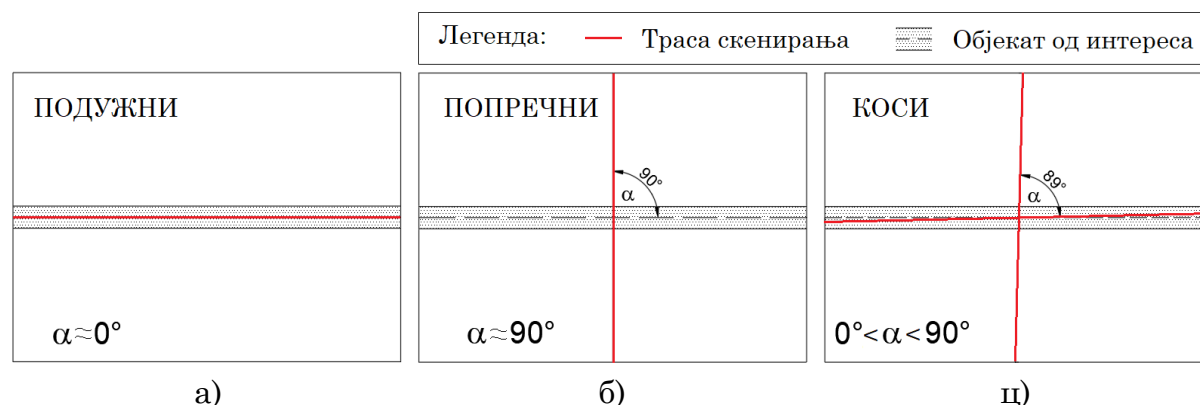
Очекивана величина тражених објеката и међусобно растојање је најједноставнији и један од најчешће коришћених приступа. Подразумева да размак профила обезбеди регистрацију објеката на основу њихове очекиване диспозиције и димензија. Односно да размак између профила није већи од очекиване величине тражених објеката и њиховог међусобног растојања [38], [39]. Траг антене подразумева минимално растојање суседних профила које ће обезбедити потпуну покривеност подручја од интереса на одређеној дубини [26].

3.1.1.4 Технике скенирања

Под техником скенирања георадаром подразумева се релативни однос трајекторије антене (дипола) и осе објекта од интереса. Према овом критеријуму технике скенирања се могу поделити на једну од следећих група:

1. Подужно (Слика 3.14а),
2. Попречно (Слика 3.14б) и
3. Косо скенирање (Слика 3.14ц).

У складу са наведеним техникама резултати скенирања носе исте називе: подужни, попречни и коси радарграми.

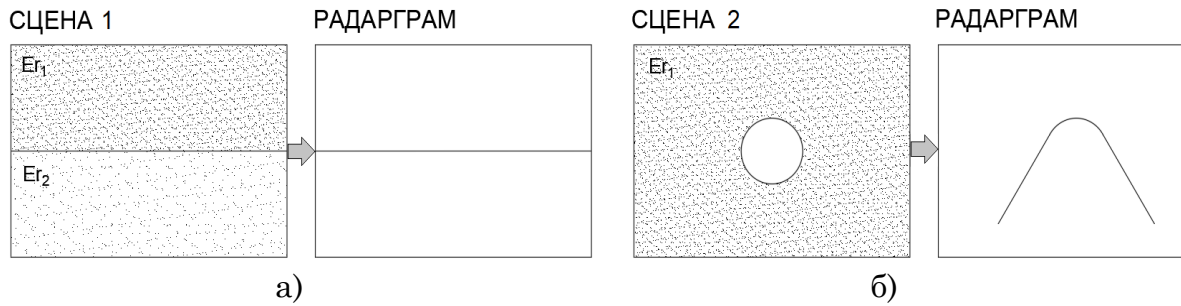


Слика 3.14 Технике скенирања георадаром

Код подужних радарграма трајекторија антене по површини је приближно иста као и правац простирања објекта од интереса (Слика 3.14а), за разлику од попречних радарграма код којих овај угао приближно износи 90° (Слика 3.14б). Радарграми који се креирају под угловима између 0° и 90° у односу на осу објекта сврставају се у групу косих радарграма (Слика 3.14ц). У оквиру ове докторске дисертације обрађују се попречни радарграми.

Према резултату скенирања, у општем смислу потребно је разликовати две врсте попречних радарграма (Слика 3.15):

1. Попречно скенирање два слоја земљишта са различитим диелектричним константама и
2. Попречно скенирање објекта кружног попречног пресека у земљишту са уједначеном вредношћу диелектричне константе.

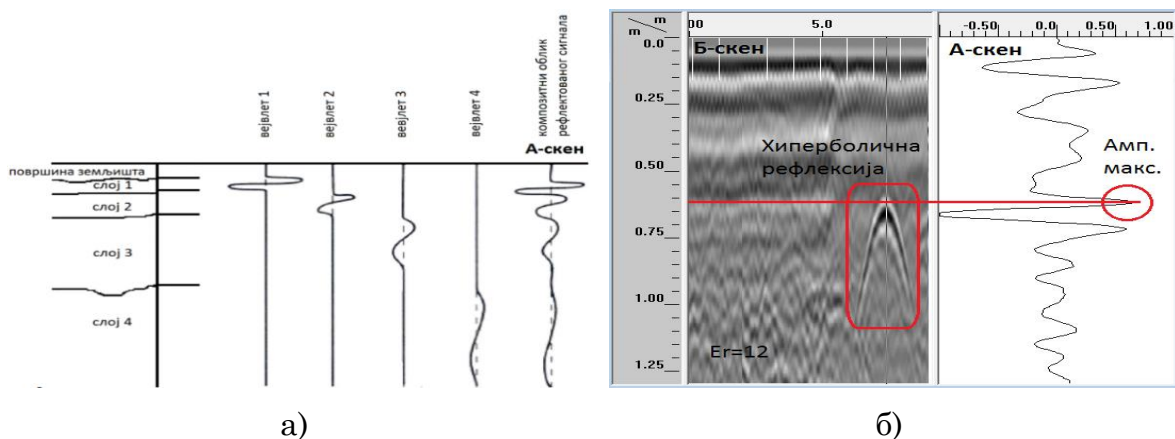


Слика 3.15 Шематски приказ сцене и радарграма за случај два слоја земљишта (а) и једног објекта кружног попречног пресека са уједначеном вредношћу ϵ_r (б)

Код скенирања два слоја земљишта са различитим диелектричним константама као резултат скенирања у радарграму формира се гранична линија између та два слоја. Скенирањем објекта кружног попречног пресека у земљишту са уједначеном вредношћу диелектричне константе у радарграму формира се облик хиперболичне рефлексije, која је детаљније објашњена у наредном подпоглављу.

3.1.1.5 Формирање радарграма

Рефлектован сигнал настао од једне таласне дужине електромагнетног таласа (помереног за 90°) назива се таласић¹³ (енг. *wavelet*). Композитни облик рефлектованог сигнала за једну позицију антене настаје конволуцијом свих таласића насталих рефлексijом од свих разделних површи на које је наишао електромагнетни талас (Слика 3.16а) [36]. Овако формирана композитна рефлексija, која одговара једном емитованом импулсу назива се *A-scan*, док низ узастопних *A-scan*-ова образује основни резултат скенирања георадаром који се зове радарграм (*B-scan*) (Слика 3.16б).

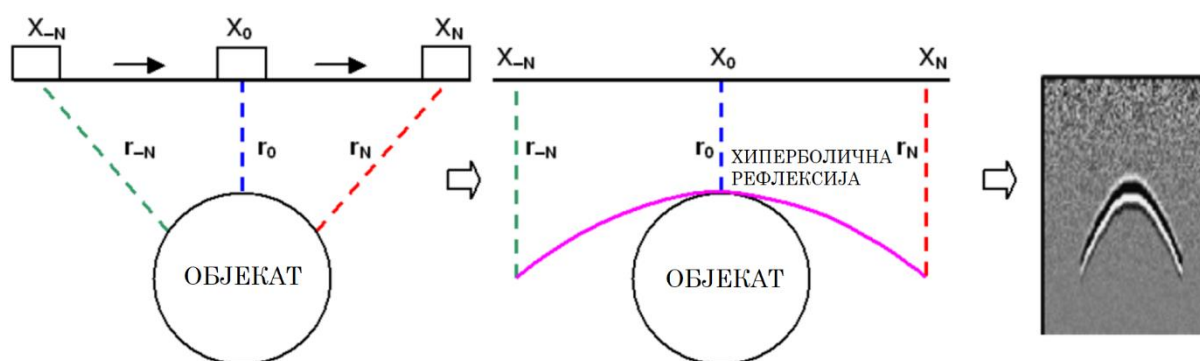


Слика 3.16 Формирање композитног облика хиперболичне рефлексije (*A-scan*) и радарграма (*B-scan*)

¹³ **Таласић** (енг. *wavelet*) - Сегмент композитног облика хиперболичне рефлексije настао на основу једне пуне периоде осциловања ЕМ сигнала кроз земљиште.

3.1.1.6 Формирање хиперболичне рефлексije

Кретањем антене по површини предајни део антене емитује конусни сноп ЕМ таласа ширине $\beta=35^\circ\div 45^\circ$. Захваљујући оваквом начину емитовања ЕМ таласа и управном скенирању један део ЕМ таласа ће се рефлектовати од објекта пре и након што се центар антене нађе тачно изнад објекта. Конволуцијом свих таласића образоваће се *A-scan*-ови код којих ће неки од одбирака садржати и рефлексiju насталу од објекта од интереса. Када се сви *A-scan*-ови пројектују нормално у односу на правац кретања антене и рефлексije претходних одбирака сукцесивно повежу у радарграму ће се за случај скенирања објекта кружног попречног пресека образовати карактеристичан облик хиперболе (хиперболична рефлексija) [40] (Слика 3.17).



Слика 3.17 Формирање идеалне хиперболичне рефлексije на радарграму

Релативна дубина од површинског слоја (по коме се креће антена) до објекта кружног попречног пресека z одређује се на основу најкраћег растојања r_0 , које представља теме хиперболичне рефлексije. Специфичан облик резултата скенирања објекта кружног попречног пресека георадаром обезбеђује могућност развоја и примене аутоматизованих процедура детекције хиперболичних рефлексija на радарграмима.

3.1.1.7 Калибрација релативне дубине

Релативна дубина до посматраног објекта одређује се на основу брзине простирања ЕМ таласа кроз земљиште. Једноставна ситуација односи се за случај одређивања брзине простирања ЕМ таласа до објекта када се ЕМ талас простира кроз ваздух. Међутим, за случај скенирања ОПИ електромагнетни таласи пролазе кроз различите слојеве земљишта који утичу на њихову брзину простирања. На основу једначина (3.11) и (3.14) брзина простирања ЕМ таласа кроз земљиште се може дефинисати према следећем изразу:

$$\vartheta = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.5)$$

Где је:

c - брзина простирања светлости у вакууму (константа)

ϵ_r - диелектрична константа (представља утицај земљишта у окружењу на простирање електричне компоненте ЕМ таласа)

У случају израза (3.5) може се закључити да на промену брзине простирања ЕМ таласа кроз земљиште највећи утицај има диелектрична константа. Различити медијуми кроз које се ЕМ талас простире имају другачију вредност диелектричне константе. У Табели 3.2 приказане су неке типичне вредности диелектричне константе.

Табела 3.2 Типичне вредности диелектричне константе

Медијум	Диелектрична константа ϵ_r	Специфична проводност σ [S/m]
Ваздух	1	0
Асфалт, сув	2-4	10^{-2} - 10^{-1}
Асфалт, влажан	6-12	10^{-3} - 10^{-1}
Бетон, сув	4-10	10^{-3} - 10^{-1}
Бетон, влажан	10-20	10^{-2} - 10^{-1}
Кречњак, сув	7	10^{-8} - 10^{-6}
Кречњак, влажан	8	10^{-2} - 10^{-1}
Песковито земљиште, суво	4-10	10^{-4} - 10^{-2}
Песковито земљиште, влажно	10-30	10^{-2} - 10^{-1}
Слатка вода	81	10^{-6} - 10^{-2}

Вредност брзине простирања електромагнетних таласа кроз земљиште првенствено зависи од састава земљишта и запреминског удела воде у земљишту. За одређивање релативне дубине z (m) поред одређивања брзине потребно је измерити и време које је потребно да електромагнетни талас пређе пут од предајног дела антене до посматраног објекта и врати се назад, и региструје на пријемном делу антене (време двоструког пута [ns]). Релативна дубина до објекта од интереса рачуна се по следећем изразу:

$$z = \vartheta \cdot \frac{t}{2} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{t}{2} \quad (3.6)$$

Где је:

z - дубина до посматраног објекта

t - измерено време двоструког пута

Основни проблем одређивања тачне вредности диелектричне константе огледа се у чињеници да су површински слојеви нехомогени и да се у зони изнад објекта од интереса често налази више од једног слоја земљишта. То значи да је брзина простирања ЕМ таласа до подземног објекта од интереса варијабилна. Овај проблем се најчешће решава осредњавањем вредности

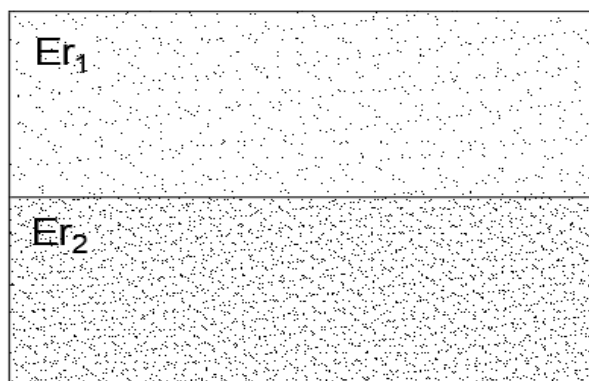
диелектричне константе за све слојеве земљишта до објекта од интереса, што се може постићи на више начина:

- а) **Коришћење педолошких карти или табеларних вредности** (Табела 3.2). Ове вредности представљају просечну вредност диелектричне константе за одређено подручје, али је грешка ове методе до 20%.
- б) **Скенирање објеката на познатој дубини** (енг. *Ground truth*). Ова метода подразумева скенирање објекта са познатом дубином, тако да се на основу израза (3.6) врши прорачун осредњене вредности диелектричне константе. Предност овог поступка је што не захтева идеалну хиперболичну рефлексију у радарграму већ је довољно да се установи локација темна хиперболичне рефлексије. Недостатак овог начина је што захтева објекат са познатом дубином. Овај начин је често применљив у пракси, а тачност одређивања вредности диелектричне константе је у опсегу од 90-95%.
- ц) **Интерактивно одређивање на основу математичког модела.** Код овог метода се на управљачкој јединици георадара врши преклапање математички предефинисане хиперболичне рефлексије са хиперболичном рефлексијом у радарграму. С обзиром да ширина крака зависи примарно од брзине простирања ЕМ таласа софтвер на основу асимптота врши прорачун вредности диелектричне константе. Предност овог начина огледа се у томе да је калибрацију могуће извршити на свим локацијама када се у радарграму формира облик хиперболичне рефлексије. Недостатак је што се захтева добро уочљива хиперболична рефлексија у радарграму и што крајњи резултат зависи са којом тачношћу ће оператер извршити преклапање постојеће са математички предефинисаном хиперболичном рефлексијом. Овај метод калибрације омогућен је само код појединих произвођача управљачких јединица. Тачност овако одређене вредности диелектричне константе је у опсегу од 90-95%.
- д) **Користећи бистатичке антене.** Калибрација бистатичких антена, код којих пријемни и предајни део антене нису у истом кућишту. Овај прорачун диелектричне константе базира се на варирању растојања између пријемног и предајног дела антене. Недостатак овог метода огледа се у томе што се бистатичке антене за георадар производе до 100MHz и мање фреквенције.
- г) **Софтверска естимација.** Софтверски начини омогућују да се поред локације и дубине објекта одреде и друге информације, попут: пречника, врсте материјала и брзине простирања ЕМ таласа. Овај начин захтева одређен степен програмирања и детаљног разумевања поступка формирања радарграма.

3.1.1.8 Ефекти поларизације ЕМ таласа

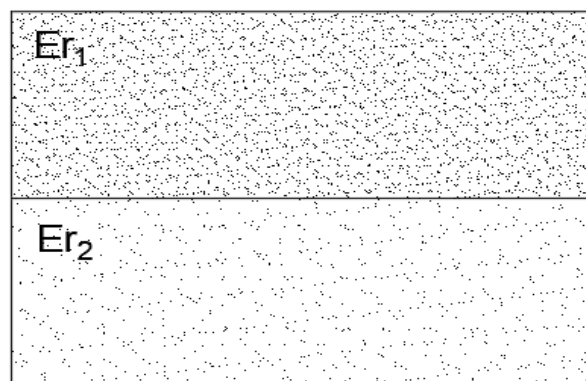
За електромагнетни талас каже се да је поларизован ако се у сваком тренутку времена може одредити правац његових компоненти. Ако се правац ових вектора мења као случајна величина онда се такав талас назива неполаризован. Талас који има само једну компоненту електричног поља (нпр. E_x или E_y) је равански поларизован талас. Компонента поларизованог таласа током времена мења свој интензитет али не и правац простирања. Код георадара ови таласи се најчешће усмеравају у подповршинске слојеве земљишта. При наиласку таласа на граничну површ између две различите средине (у електромагнетном погледу) један део ЕМ таласа ће се одбити, а други ефектом преламања наставити до наредних слојева медијума у који се усмерава. Рефлектовани део ЕМ таласа који се региструје на пријемном делу антене уобичајено се приказује као копија емитованог импулса. То значи да се за случај емитованог импулса у облику позитиван-негативан пик, као резултат рефлексије очекује прво позитиван пик (Слика 3.18 и Слика 3.19а).

$E_{r1} < E_{r2}$ У фази



а)

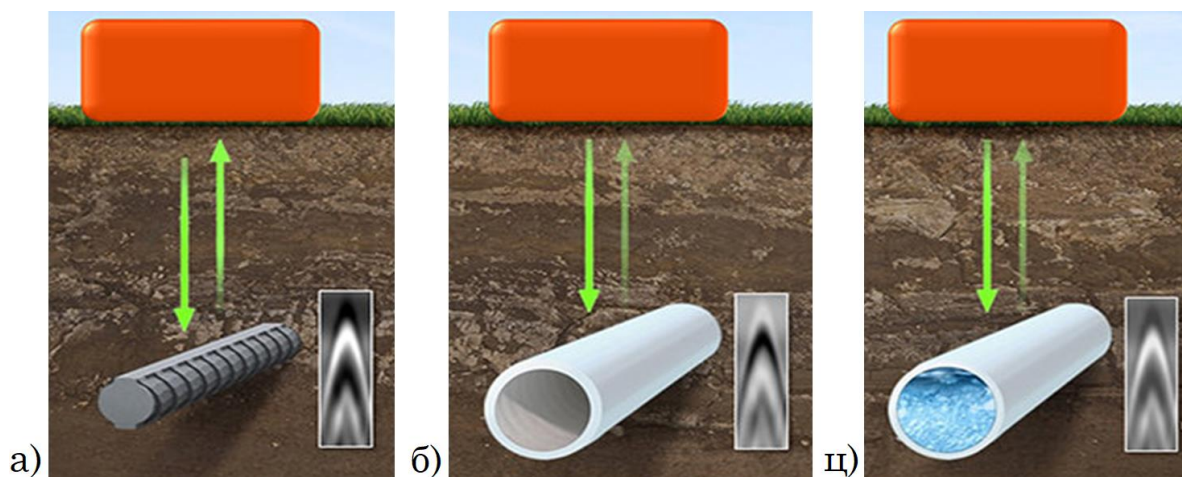
$E_{r1} > E_{r2}$ Фазно померен за 180°



б)

Слика 3.18 Пример када је сигнал у фази (а) и када је фазно померен за 180 степени (б)

Фазно померање рефлектованог сигнала за 180 степени настаје у случају када ЕМ талас прелази из земљишта са већом диелектричном константом у земљиште са мањом вредношћу диелектричне константе (Слика 3.18б). У пракси ово је најчешће случај код скенирања празних ПВЦ цеви (Слика 3.19б) или других шупљина у медијуму које су испуњене ваздухом, а до којих ЕМ талас са својим особинама може да дође. У случају ПВЦ цеви која је у потпуности испуњена водом неће доћи овог ефекта, с обзиром да је вредност диелектричне константе воде 81 а земљишта у окружењу типичних вредности до 15 (Слика 3.19ц).



Слика 3.19 Изглед радарграма за неколико различитих водова: метални вод (а), празна ПВЦ цев (б), пуна ПВЦ цев (ц)

3.2 Простирање ЕМ таласа кроз земљиште

Основни принципи рада технологије скенирања георадаром могу се дефинисати кроз анализу простирања ЕМ таласа кроз слојеве земљишта. Ово простирање описује се Максвеловим једначинама, које су приказане и објашњене у наставку.

3.2.1 Максвелове једначине

За опис простирања ЕМ таласа формирају се вектори јачине електричног и магнетног поља као функција времена просторних координата. Ови вектори у хомогеној линеарној средини задовољавају Максвелове једначине, које се могу представити у виду таласних односно Хелмхолцових једначина:

$$\Delta \cdot \vec{E} - \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \cdot \sigma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (3.7)$$

$$\Delta \cdot \vec{H} - \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu \cdot \sigma \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad \varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \quad (3.9)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (3.10)$$

Где је:

\vec{E} - вектор јачине електричног поља [V/m]

\vec{H} - вектор јачине магнетног поља [A/m]

ε - електрична константа медијума [F/m]

ε_0 - електрична константа вакуума [F/m]

ε_r - релативна електрична константа

μ - магнетна константа медијума [H/m]

μ_0 - магнетна константа вакуума [H/m]

μ_r - релативна магнетна константа

σ - специфична проводљивост медијума [S/m]

Као последица утицаја електричних и магнетних својстава ЕМ таласи ће проласком кроз хетерогено земљиште имати променљиву брзину простирања (3.11).

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \quad (3.11)$$

Простирање ЕМ таласа кроз медијум који није савршен изолатор, код кога се узима у обзир и утицај специфичне проводности медијума описан је следећим једначинама:

$$\vec{E}_x(z, t) = E \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cos[\omega \cdot t - \beta \cdot z + \theta_E] \quad (3.12)$$

$$\vec{H}_y(z, t) = \frac{E}{|\underline{Z}|} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cos[\omega \cdot t - \beta \cdot z + \theta_E - \theta_Z] \quad (3.13)$$

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \sqrt{\left(1 - j \cdot \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon}\right)}} [\Omega] \quad (3.14)$$

Где је:

E - ефективна вредност компоненте електричног поља \vec{E}_x

θ_E - почетна фаза електричног поља

θ_Z - аргумент импедансе средине

α - коефицијент слабљења ЕМ сигнала кроз медијум [dB/m]

\underline{Z} - комплексна импеданса

Једначине 3.12 и 3.13 указују на експоненцијалан пад амплитуде ЕМ таласа његовим простирањем дуж z осе. Генерално, параметри ε , j , σ су комплексне величине, тако да одређивање параметара α и β није једноставно. На основу израза за брзину простирања таласа (3.15) уочава се утицај специфичне проводности, односно појаве дисперзије електромагнетног таласа [36].

$$\vartheta = \frac{\omega}{\beta} \approx c \cdot \left(1 - \frac{\sigma^2}{8 \cdot \omega^2 \cdot \varepsilon^2}\right) \left[\frac{m}{s}\right] \quad (3.15)$$

Приказане једначине указују на то да је практична примена Максвелових једначина за одређивање параметара поља током скенирања георадаром ограничена њиховом сложености. За њихову практичну примену усвојене су следеће претпоставке:

- Утицај магнетних својстава долази до изражаја само на специфичним локацијама (нпр. у близини активних и угашених вулкана и на планети Марс, стога се може занемарити ($\mu_r \approx 1$)).
- Утицај специфичне проводности се најчешће усваја из табеларних вредности (Табела 2).

3.3 Резиме поглавља

У уводном делу овог поглавља наведена је основна подела геофизичких метода за детекцију ОПИ са акцентом на електромагнетне методе. У наставку се детаљно објашњава метод и технологија скенирања георадаром.

У првом делу су наведене основне предности георадара и његове области примене. Затим су детаљно објашњени хардверски елементи георадара са акцентом на управљачку јединицу и антену као основне компоненте георадара.

Други део се бави анализом принципа рада георадара у смислу описивања механизма кретања ЕМ таласа. У овом делу се објашњавају ефекти одбијања, преламања, дисперзије и поновљених рефлексива ЕМ таласа.

Трећи део обухвата модове аквизиције (*A-scan*, *B-scan* и *C-scan*) као и технике скенирања георадаром (подужно, попречно и косо).

Четврти део се бави формирањем радарграма као основног улазног податка за процесирање у оквиру дисертације. Надаље је објашњен начин формирања хиперболичне рефлексиве која настаје као резултат скенирања објеката кружног попречног пресека, што је у фокусу ове дисертације.

У завршном делу поглавља објашњени су поступци калибрације релативне дубине и ефекти поларизације електромагнетних таласа. Поглавље завршава математичким описом простирања ЕМ таласа кроз медијум преко Максвелових једначина.

4. Аутоматизовани поступци обраде радарграма

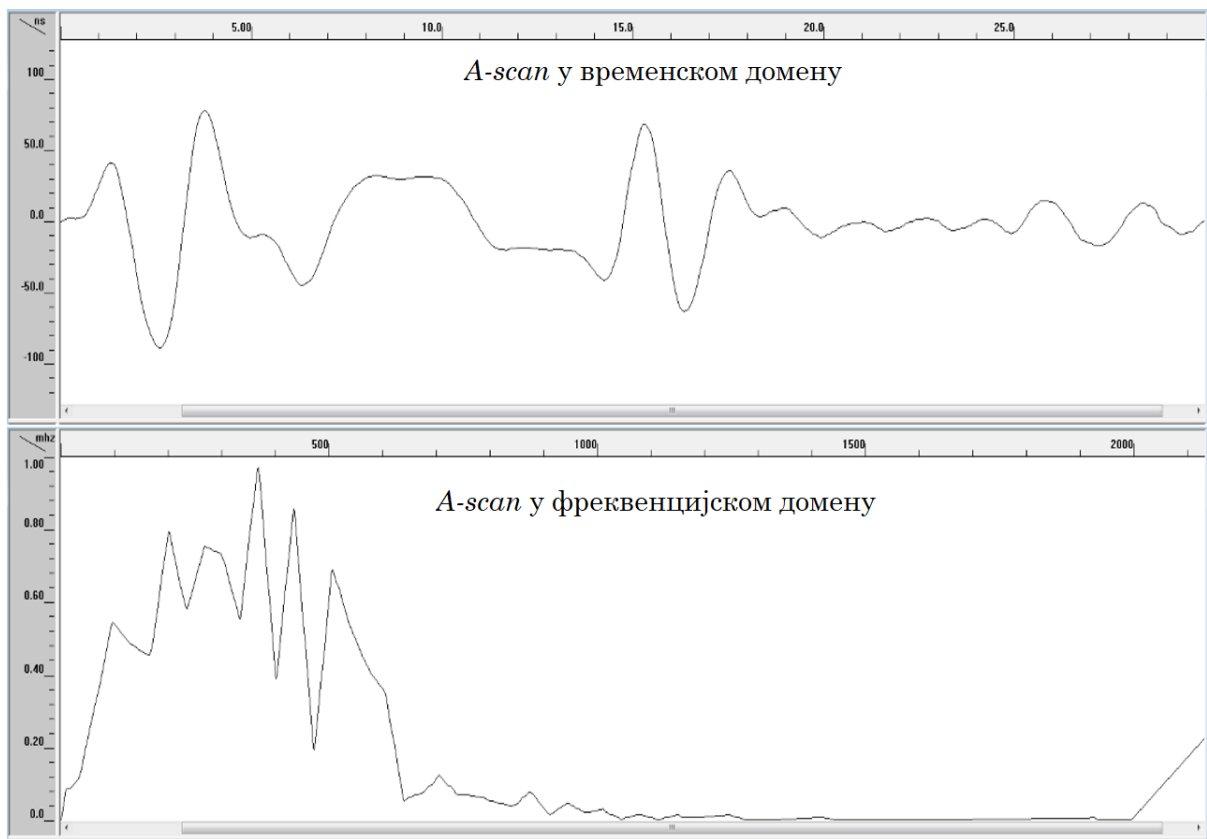
У оквиру Поглавља 4.1 анализирани су постојећи поступци за обраду радарграма како би се установио допринос предложеног поступка у општој класификацији и обезбедила њихова компаративна анализа.

4.1 Начин обраде радарграма

У општем смислу, обрада радарграма врши се у фреквенцијском и временском домену (Слика 4.1). Код временског домена свака рефлексја ЕМ таласа приказана је са амплитудом израженом у процентима (дуж x осе) и са одбирком дуж y осе. Позиција ОПИ у простору је дефинисана амплитудним екстремом и припадајућом вредношћу времена двоструког пута ЕМ таласа. За дати екстрем могуће је конверзијом одредити дубину. При обради радарграма анализира се група узастопних рефлексја, које заједно, у случају присуства ОПИ образују одговарајући геометријски облик, те се анализа своди на препознавање облика на слици - хиперболичне рефлексје (Поглавље 3.1.1.6). Оваквим приступом обезбеђује се одређивање свих кључних параметара о ОПИ. У првом кораку, обезбеђено је лоцирање и проналазак координата темена објекта од интереса, што у наставку омогућује одређивање преостала два параметра (брзину и радијус) на основу координата тачака које се налазе на крацима хиперболичних рефлексја. Са друге стране, анализа у фреквенцијском домену није предвиђена за препознавање геометријских облика и одређивање додатних параметара ОПИ, попут брзине и радијуса. Приказ резултата у фреквенцијском домену назива се и амплитудски спектар, код којег се на апсциси приказује фреквенција а дуж ординате амплитуда сигнала (0-100%). Позитивна страна обраде радарграма у фреквенцијском домену је што носи информације које не зависе од визуелне перцепције и препознавања облика на начин својствен човеку.

У досадашњим истраживањима, обрада радарграма у фреквенцијском домену примењивана је за локализацију објеката у комбинацији са анализом у временском домену или трансформацијом појединих сегмената сигнала. Анализа радарграма у временском домену носи информацију о амплитуди сигнала за сваки сегмент *A-scan*-а кроз време, те је омогућена анализа радарграма на локалном нивоу, препознавање објеката у виду геометрије и одређивање додатних параметара, попут брзине и радијуса.

На основу претходно наведених особина у оквиру ове дисертације, као улазни податак за аутоматизовани поступак обраде користиће се радарграм у временском домену.



Слика 4.1 A-scan у временском и фреквенцијском домену

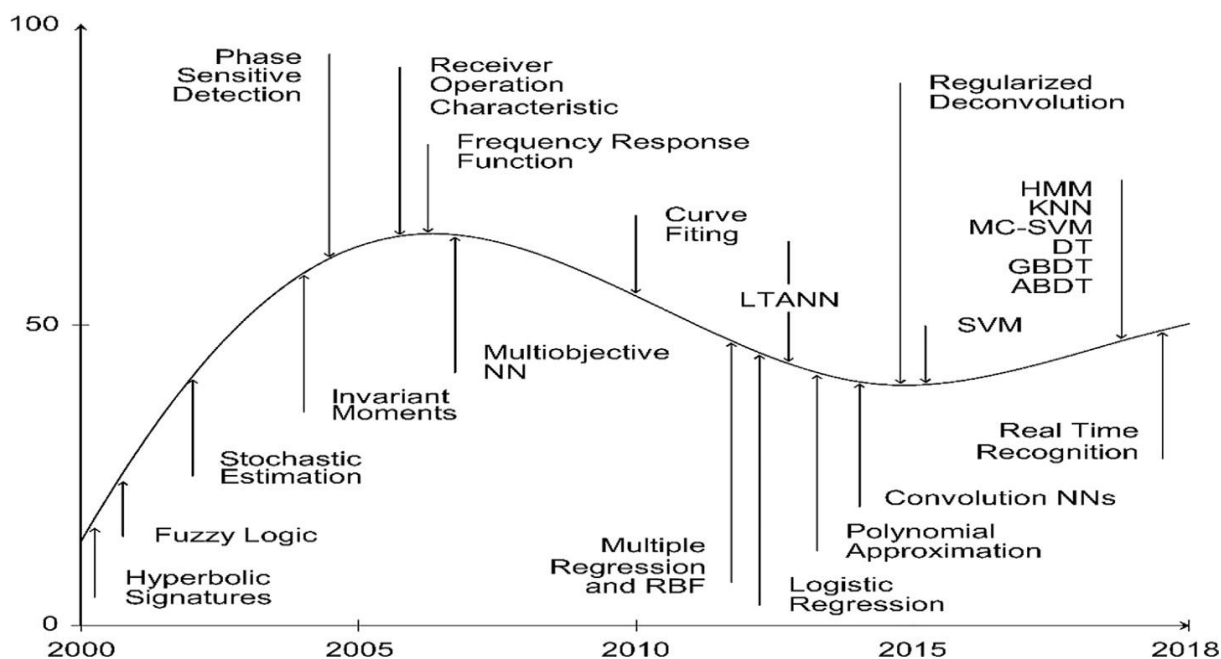
4.2 Тренутно стање у научној области

Процедуре за потребе аутоматске обраде радарграма у временском домену могу да се реализују анализом целокупног или поједностављеног (бинаризованог) радарграма. Код анализе радарграма у виду слике могу се применити:

- а) Процедуре без надзора (нпр. Хјуова трансформација)
- б) Процедуре са надзором (нпр. вештачке неуронске мреже - *Artificial Neural Networks, ANN*)

Према сазнањима аутора, постојеће стратегије за детекцију хиперболичних рефлексија на радарграму подразумевају примену неког од следећих алгоритама: *Hough* [41]–[47], *Wavelet* [48] или *Radon* трансформацију [49], затим стандардне алгоритме за препознавање облика, као што је *Support-vector machine (SVM)* [50], [51], *ANN* [52], [53] или *Convolution Neural Network (CNN)* [54]. Проучавањем вештачке интелигенције на рачунарима настали су алгоритми машинског учења – *Machine Learning (ML)* [45], [46]. За разлику од алгоритама статичког програмирања *ML* алгоритми су конструисани тако да „уче“ из анализираних података и формирају предвиђања [55]. Тренутно је уобичајено да се *ANN* сматрају техником *ML*. На Слици 4.2 приказан је развој

техника и алгоритма који су примењени у процедурама анализе и обраде радарграма. Обухваћени период је од 2000. године до тренутка писања дисертације. Са Сlike 4.2 уочава се да су над обрадом радарграма примењене разне технике и алгоритми. Још од 2000. године кренуло се са развојем алгоритма за препознавање хиперболичних рефлексја на радарграмима. У тренутку писања ове дисертације уводи се примена конволуционих неуронских мрежа и *SVM* за обраду радарграма. Од 2018. године па до данас акценат је на процесирању радарграма у реалном или блиско реалном времену. Стога је у оквиру дисертације истраживање базирано на развоју алгоритма који ће вршити процесирање у реалном или блиско реалном времену.



Слика 4.2 Развој техника у поступку анализе радарграма од 2000 године до данас [55]

Хјуову трансформацију карактерише дуже време извршавања, јер је рачунски врло захтевна [56]. Обучавање вештачких неуронских мрежа врши се помоћу обрађеног сигнала статистичких дескриптора података [57], сетова података који моделују простирање ЕМ таласа у специфичним условима [58], [59] или спектралне процене густине сегмената сигнала [60]. Поступком бинаризације [61] или сегментацијом радарграма са детекцијом ивица [62] врши се најлакше обучавање вештачке неуронске мреже.

Висок ниво интерференције и зашумљености радарграма, настао као последица сложене диспозиције већег броја ОПИ сачињених од различитих врста материјала и димензија у нехомогеном земљишту [63] представљају основни проблем за аутоматизовану детекцију хиперболичних рефлексја у радарграму. Аутоматизован процес препознавања хиперболичних рефлексја за комплексан садржај радарграма анализиран је у радовима [6], [13]. У раду [6] детекција темена хиперболичних рефлексја врши се проналаском

математички предефинисане хиперболе која најбоље испуњава унапред дефинисане критеријуме за сваки ивични пиксел на радарграму. Постојање хиперболичне рефлексије се дефинише помоћу низа пажљиво одабраних критеријума који проналазе хиперболичну рефлексију са највећим процентом ивичних пиксела у њеној непосредној околини. Највећа мана наведеног алгоритма је немогућност извршавања процеса у блиско реалном времену. У раду [15] предложено је вишеструко убрзање процеса обраде, постигнуто елиминацијом већег броја ивичних пиксела у почетној фази алгоритма. Такође, ово убрзање процеса обраде предложено је и анализирано кроз прву фазу Алгоритма 2 (*gprCAPEX*) у оквиру ове дисертације.

Поступак аутоматског препознавања неметалних водоводних цеви на реалним радарграмима анализиран је у раду [64].

Кроз неколико радова аутори истражују повезивање резултата са више антена. Један овакав пример објашњен је у раду [65] у коме се за аутоматску детекцију ОПИ користи динамичка *Bayesian* мрежа, која је успешно примењена за формирање 3Д модела. Аутори у раду [66] представљају употребу низа пријемних антена за локализацију појединачних ОПИ. Поступак локализације показао се успешним и у случајевима када је објекат од интереса изван централне зоне низа пријемних антена. Евалуација је извршена над низом синтетичких радарграма добијених коришћењем програма отвореног кода *gprMax* [35], [67]. Метода базирана на коришћењу „паметних“ антена и радарских техника (енг. *Sub-Array Processing - SAP*), објашњена је у радовима [68]–[70].

Обучавајућу неуронску мрежу у области обраде дигиталне слике користи већи број метода [57], [61], [71]–[75]. Основи циљ ове примене је што квалитетнија сегментација дигиталне слике. У раду [52], аутори илуструју како различити нивои шума могу утицати на перформансе детекције објеката од интереса заснованих на *ANN*. Недостатак великог и квалитетног сета података за примену *ANN* аутори у истраживањима уобичајено надомешћују применом синтетичких радарграма [50].

У обради радарграма често се примењују разни оператори за детекцију ивица. Детекција ивица најчешће се врши помоћу *Canpy* оператора [76] над целокупним или појединачним сегментима радарграма. Овај оператор у циљу откривања „јаких“ и „слабих“ ивица користи две граничне вредности. Слабе ивице се укључују у крајњи резултат само за случај да су повезане са јаким ивицама. Примена функција за откривања ивица смањује количину података који треба да се обради што омогућује да овај систем функционише у реалном времену [60].

Анализом радова из ове области може се закључити да процесирање реалних радарграма представља веома захтеван задатак у погледу израчунавања и временских ресурса. Сложена диспозиција ОПИ, карактеристике ГПР антене техника скенирања и други утицаји остварују настанак конструктивне

интерференције ЕМ таласа који узрокују генереисање непостојећих (лажних) хиперболичних рефлексија. Постоји велика осетљивост на шум, при чему се често и лажне хиперболичне рефлексије детектују као позитиван резултат. Осим тога, приметно је да је већина поступака усмерена на анализу поједностављеног радарграма, који се може добити на више начина [71]:

1. Поједностављење и екстракција података из хиперболичних рефлексија,
2. Издвајањем малих 2Д сегмената из радарграма (подручја од интереса) и екстракцијом података из хиперболичних рефлексија,
3. Бинаризацијом радарграма и анализе таквог сета података.

Са техничке стране, поступци за детекцију хиперболичних рефлексија у радарграму су сложени због различите врсте медија изнад ОПИ (различитих геолошких средина и запреминског садржаја влаге); непотпуних и зашумљених хиперболичних рефлексија (прекиди рефлексије објекта од интереса, нехомоген медиј) као и преклапања суседних хиперболичних рефлексија (процена припадности) [12].

4.3 Правци развоја алгоритма

У оквиру дисертације развој алгоритама за поступак аутоматизоване обраде радарграма врши се у временском домену. Примарни разлози за то огледају се у брзом одзиву који омогућује примену различитих метода обраде у блиско реалном времену, као и могућност екстракције података на локалном нивоу.

Радарграм у дигиталном запису представља 2Д матрицу, сачињену од врста и колона. Врсте дефинише број одбирака/*scan*-у (задаје се непосредно пре поступка аквизиције) што представља вертикалну резолуцију скенирања, док се колоне (*scan*-ови) генеришу у процесу аквизиције на растојању [*scan/m*] које представља хоризонталну резолуцију скенирања [56]. У пресеку сваке врсте и колоне налази се ћелија (пиксел) која носи информацију о конволуираној рефлексији сигнала насталој на одговарајућој дубини. Регистрована вредност рефлексија записује се помоћу дефинисаног параметра радиометријске резолуције (најчешће 8-бита или 16-бита). Из наведених разлога радарграм се може посматрати као слика (2Д матрица), код кога сваки пиксел садржи јединствену бројчану вредност. Записан на овакав начин, радарграм у потпуности подлеже широком спектру метода које се могу применити у поступку обраде дигиталне слике. Ова особина омогућује примену различитих метода локализације, детекције и сегментације објеката од интереса. Генерално, као резултат сегментације могу се добити мање зоне од интереса или смањен број пиксела за даљу анализу. Први случај обично је базиран на

неком од поступака класификације са надзором, док други случај подразумева бинаризацију улазних података.

У оквиру дисертације, за детекцију хиперболичних рефлексивних радарграма примењују се две методе:

1. *Cascade Object Detector (COD)* и
2. Конволуционе неуронске мреже (*CNN*),

Развој алгоритма у оквиру дисертације треба да задовољи опште критеријуме, попут: једноставности, брзине процесирања, примене, модуларности и прилагодљивости. Наиме, предложени алгоритам треба да буде једноставан за имплементацију и да се комплетна обрада радарграма извршава у блиско реалном времену. Са становишта употребе, неопходно је обезбедити применљивост алгоритма над сетом како синтетичких тако и реалних података.

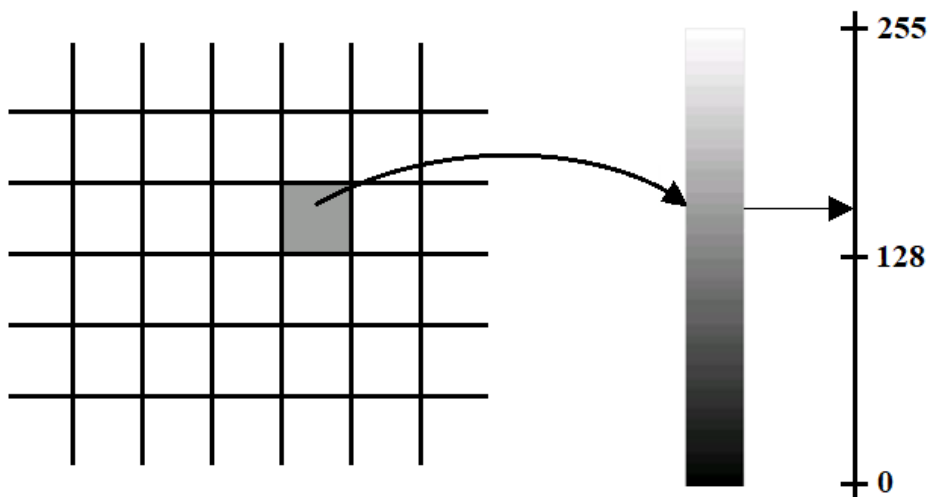
4.4 Дигитална слика

У математичком смислу слика може бити представљена као функција две реалне променљиве, $f(x, y)$. Променљиве, (x, y) , означавају просторне координате, а вредност функције се генерално може повезати са интензитетом неке физичке величине (нпр. светлости) у датој тачки.

Радарграм (*B-scan*) представља дигиталну 2Д репрезентацију са скениране локације, чије димензије зависе од параметара аквизиције, те се у потпуности може третирати као 2Д дигитална слика. 2Д дигитална слика представља 2Д матрицу коначних димензија¹⁴, код које се у пресецима колона и врста најчешће налазе целобројне вредности.

У пракси се поред термина дигитална слика често користи и термин растерска слика, где се растер односи на мрежу локација пиксела. Пиксел представља најмањи графички елемент слике коме се придружује одређена вредност или више вредности. За случај радарграма то су појединачне вредности. Уобичајено је да се код дигиталних слика као мера квалитета слике користи термин резолуција, која се може посматрати по обе осе. Овај термин одговара хоризонталној и вертикалној резолуцији радарграма. У поступку квантизације сваком пикселу се додељује јединствена вредност из предефинисаног скупа интензитета. У случају записа радарграма та вредност представља степен рефлексивности сигнала за посматрани пиксел и најчешће се записује са 2^8 (256 нивоа интензитета, Слика 4.3) или 2^{16} могућих вредности.

¹⁴ http://vision.stanford.edu/teaching/cs131_fall1718/files/cs131-class-notes.pdf, p. 47, [датум приступа: 25.07.2020.]



Слика 4.3 Квантизација вредности пиксела

Разлика код процеса квантизације радарграма у односу на дигиталне слике огледа се у томе да вредности пиксела могу бити и са негативним предзнаком (нпр. у опсегу -128 до 127 нијанси, *int8*). Како би се ова скала прилагодила даљој обради потребно је извршити пресликавање 2Д матрице са нијансама пиксела од нпр. -128 до 128 у 2Д матрицу са нијансама пиксела од 0-255 (*unit8*). Пресликавање неће имати негативан утицај у односу на оригиналне вредности пиксела, јер релативна разлика интензитета пиксела остаје непромењена. Дигитална слика која се записује само са нијансама сиве боје назива се *grayscale*.

Поред *grayscale* дигиталних слика често се користе и слике у боји. Међутим, оне нису у фокусу дисертације, јер се вредности одбирака у радарграму записују са нијансама сиве боје. Обрада дигиталних слика на рачунару и екстракција информација из њих ослања се на основне концепте базиране на *Computer Vision (CV)*.

4.5 Computer Vision

Computer Vision представља научну област која врши екстракцију информација из дигиталне слике. Главни фокус *CV* је откривање геометријских структура и препознавања облика који се налазе у дигиталним сликама [77]. Основе обраде базиране су на филтрирању, детекцији ивичних пиксела, просторном опису или текстури дигиталне слике. Дигитална структура слике у основи представља геометријску или визуелну тополошку структуру, попут регија, линијских сегмената, суседних пиксела и слично. Појам регије дигиталне слике подразумева сет више пиксела на једном делу дигиталне слике, при чему свака регија има неки облик. У интерпретацији дигиталне слике неки од региона садрже геометријски облик објекта од

интереса. Начин анализе дигиталне слике по регијама доводи до различитих облика сегментације, који имају практичну вредност када је у питању препознавање геометријских облика од интереса на дигиталним сликама [77]. Поступци анализе разликују се према параметрима које третирају (нпр. суседност пиксела, интензитет пиксела, градијент, величина пиксела). Објекат од интереса на дигиталној слици повезан је са различитим позадинским пикселима на нивоу суседних пиксела. Детекција ивичних пиксела као и велик број метода обраде дигиталне слике базиран је на анализи суседних пиксела. Основна подела информација које се добијају из обраде слике у *CV* могу се поделити у две групе:

1. Мерене информације и
2. Семантичке информације

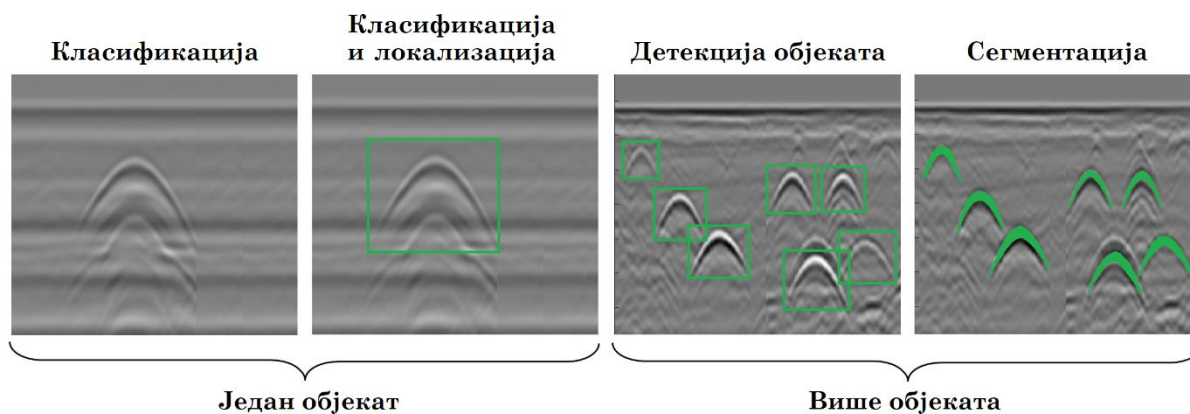
Мерене информације имају велику примену код одређивања геометрије и димензија жељеног објекта или нпр. кретања робота у непознатом окружењу. Са друге стране слика садржи велик број семантичких информација које рачунар треба да искористи за доношење крајњих закључака (нпр. селекција региона на радарграму који садржи хиперболичне рефлексије).

Computer Vision проналази велику примену у специјализованим применама, попут:

- **Израда 3Д модела градова.** Фотографисање објеката са земље и/или ваздуха може бити искоришћено за израду 3Д модела града.
- **Даљинске детекције.** Обрада сателитских снимака (радарских и мултиспектралних) за потребе детекције/класификације објеката од интереса.
- **Детекција лица.** Препознавање лица је теже од детекције, али се успешно користи у различитим апликацијама, попут *Facebook*-а. Поред детекције лица, *CV* проналази примену и код биометрије, користећи јединствене отиске прстију или узорка зенице ока.
- **Препознавање знакова.** Овакав вид обраде података проналази велику примену код читавања регистарских ознака на возилима, поштанских бројева или комплетних докумената у сликовном облику.
- ***Augmented Reality (AR)*.** Обезбеђује додавање нових објеката у жељено окружење и њихову манипулацију преко мобилних/таблет апликација.
- ***Virtual Reality (VR)*.** Током кретања алгоритам треба да ажурира тренутну сцену са положајем свих објеката на реалан начин.

Основни проблем препознавања објеката на сликама или видеу може се поделити у четири основне категорије (Слика 4.4), и то:

- класификација
- класификација + локализација
- детекција објеката
- сегментација



Слика 4.4 Основне категорије препознавања објеката на сликама/видеоу

Класификација. Прва категорија подразумева сврставање (класификацију) слике у једну од унапред задатих група. Повећањем броја класа тежина овог задатка се пропорционално повећава. Данас постоји неколико детектора обучених за класификацију слике и у преко 1000 класа.

Класификација са локализацијом. Ова категорија поред разврставања слике у одговарајућу класу подразумева и локализацију објекта. Процес локализације захтева додатне алгоритме који на излазу дају правоугаоник у коме се налази објекат од интереса.

Прве две категорије се подразумевано примењују над сликама на којима се налази по један објекат од интереса.

Детекција објеката. Овај задатак је сличан класификацији са локализацијом с тим што обезбеђује проналазак више објеката на слици који могу бити из различитих класа.

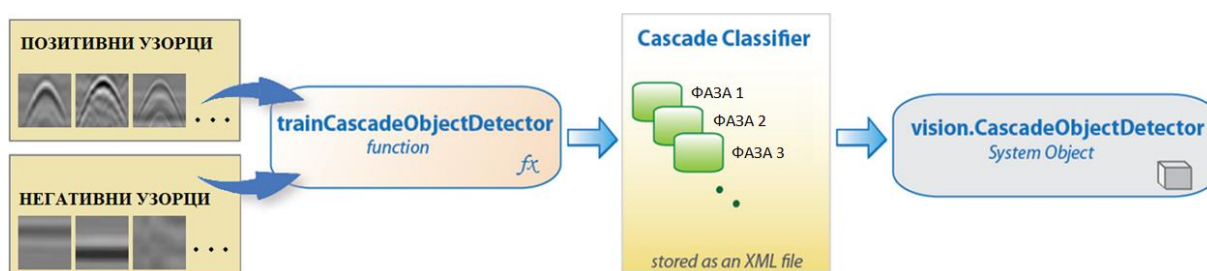
Сегментација. Под сегментацијом се подразумева сврставање пиксела на слици који припадају неком од објеката. Ово је свакако најсложенији задатак у наведеној подели.

Постојећи алгоритми омогућују детекцију објеката од интереса на сликама и лоцирање објеката у видео запису. Процент детекције и квалитетног праћења објеката од интереса примарно зависи од сложености објеката, степена разлике у односу на околинду као и квалитетне обуке или подешавања параметара за његову детекцију. *Deep Learning* и *Machine Learning* алгоритми се базирају на решавању ових задатака.

У оквиру дисертације обухваћен је део који се односи на детекцију објеката са једном класом (хиперболична рефлексација), као и сегментацијом слике у виду одређивања тачака на крацима хиперболичних рефлексација. За детекцију хиперболичних рефлексација примењене су две методе: *Cascade Object Detector (COD)* из групе *Machine Learning* алгоритама и *Faster R-CNN* конволуциона неуронска мрежа, из групе дубоког учења (*Deep Learning*).

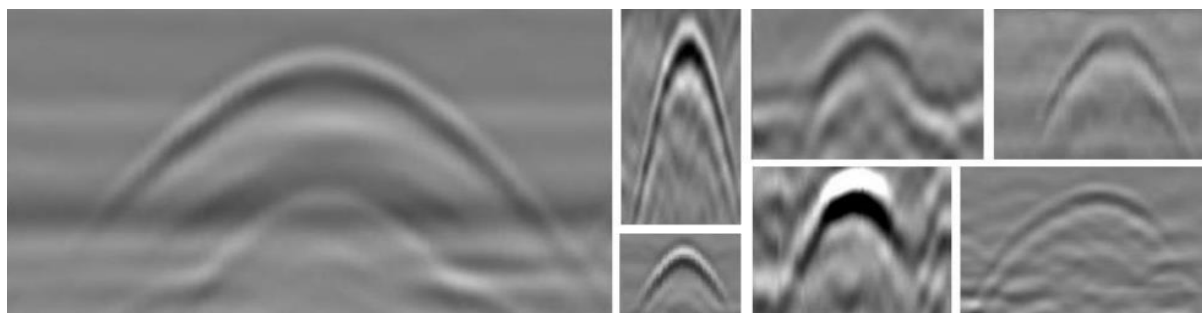
4.6 Детекција објекта на основу *Cascade Object Detector-a*

Cascade Object Detector (COD) детектор може да детектује објекте чије се пропорције значајно не разликују. У ову групу убрајају се саобраћајни знаци, детекција лица и слично, за које већ постоје готови модели обуке. Поред готових модела овај детектор обезбеђује израду и прилагођавање специјализованих детектора (нпр. за детекцију хиперболичних рефлексција на радарграму). Важно је напоменути да геометрија хиперболичних рефлексција зависи од више параметара: дубине ОПИ, карактеристика земљишта у окружењу, димензија, геометрије и материјала објекта од кога су настале. Разлике у геометрији хиперболичних рефлексција могу да утичу на квалитет крајњег резултата *COD* детектора. То значи да треба размишљати о различитим обукама у којима ће фигурирати приближно исте пропорције хиперболичних рефлексција. Основна идеја наведеног алгоритма огледа се у томе да је бржи начин да се одбаце сегменти слике који не садрже објекат него да се врши директна претрага објекта од интереса (из наведене чињенице потиче и назив каскадни класификатор). Генерално, *COD* детектор се састоји од неколико кључних сегмената који су приказани на Слици 4.5.

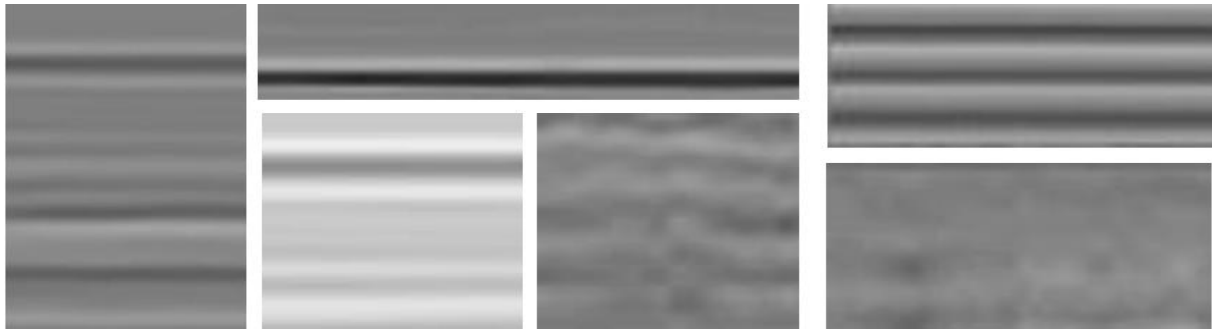


Слика 4.5 Сегменти у оквиру *Cascade Object Detector-a (COD)*

Да би класификатор могао да се примени на наведени начин у првој фази се врши обука. Процес обуке подразумева задавање великог броја позитивних и негативних узорка. Под позитивним узорцима подразумевају се сегменти дигиталне слике који садрже објекат од интереса, за разлику од негативних узорка који га не садрже. Код аутоматизованог процеса обраде радарграма под позитивним узорцима се подразумевају сегменти радарграма који садрже хиперболичне рефлексije (Слика 4.6), док негативни узорци подразумевају регионе радарграма без хиперболичних рефлексija (Слика 4.7).

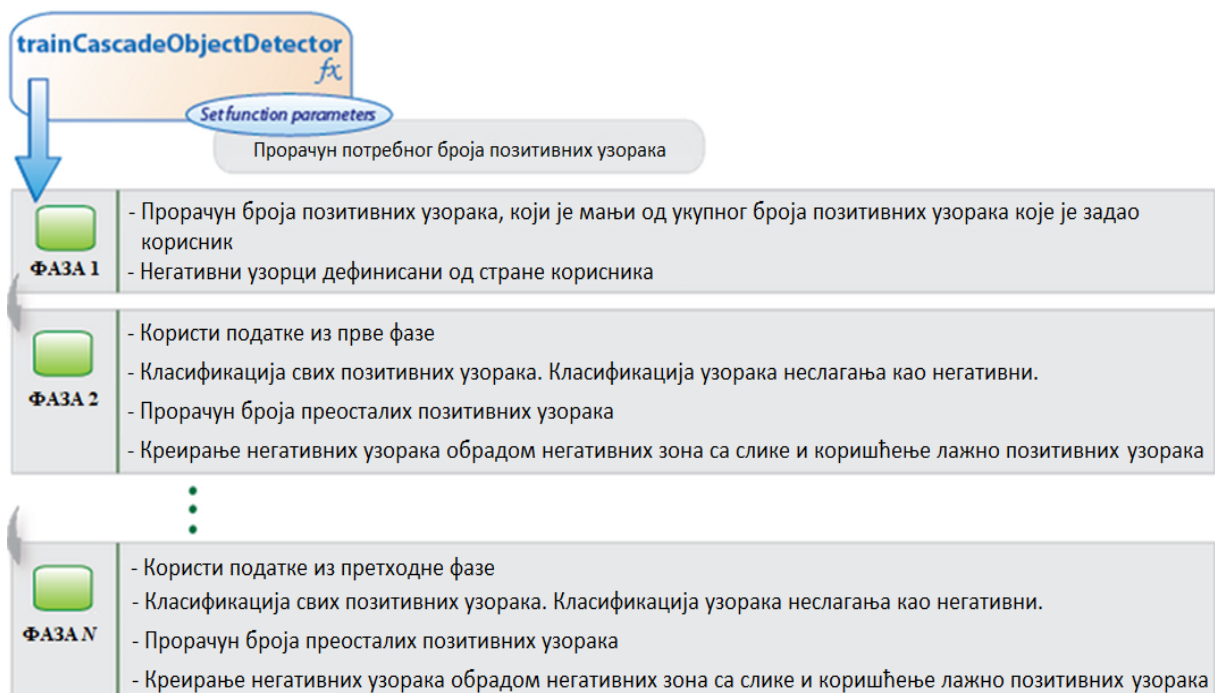


Слика 4.6 Позитивни узорци за обуку



Слика 4.7 Негативни узорци за обуку

Примена детектора захтева креирање обучавајућег скупа (обуке) сачињене од позитивних и негативних узорака. Подаци са позитивним узорцима обично се чувају у две колоне. У првој колони се налази путања до слике која садржи позитиван узорак, док друга колона садржи матрицу са оквирима (енг. *Bounding Box*) региона позитивних узорака са слике. Број редова матрице једнак је броју позитивних узорака са слике. Други начин за структурирање података у обуци је да се задају путање до припремљених позитивних узорака. Скуп негативних узорака најчешће се задаје преко путање до слике која не садржи позитивне узорке. На основу дефинисаних узорака врши се обука, која се састоји из неколико фаза (Слика 4.8).



Слика 4.8 Фазе у оквиру *trainCascadeObjectDetector-a*

Подешавање параметара детектора подразумева оптимизацију броја фаза, негативне и позитивне стопе детекције, као и тип функције која ће се користити за обуку¹⁵. Објашњење ових параметара дато је у наставку.

¹⁵ <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/traincascadeobjectdetector.html>, [датум приступа: 25.07.2020.]

- **Број фаза** односи се на N корака који су приказани на Слици 4.8.
- **Негативна стопа детекције** подразумева селекцију региона које не садрже објекат од интереса а класификатор их је сврстао у групу као да се у њима налази објекат од интереса.
- **Позитивна стопа** представља класификацију региона у којима се налази објекат од интереса.
- **Тип функције** односи се на различите особине које овај детектор може да користи у циљу детекције објекта од интереса.

У Табели 4.1 наведени су предлози за подешавање параметара, који су примарно дефинисани на основу броја узорака.

Табела 4.1 Подешавање параметара у процесу обуке COD-а

Број узорака / проблем	Предложено решење
Велики сет података на улазу	Повећање броја фаза и већа негативна стопа детекције у свакој фази.
Мали сет података на улазу	Смањење броја фаза и мања стопа негативних узорака у свакој фази.
Смањење вероватноће да објекат не буде регистрован	Повећање позитивне стопе. Међутим, тиме се повећава вероватноћа да детектор произведе негативну стопу детекције.
Смањење процента негативне стопе детекције	Повећање броја фаза или смањење стопе негативне стопе детекције по фази.

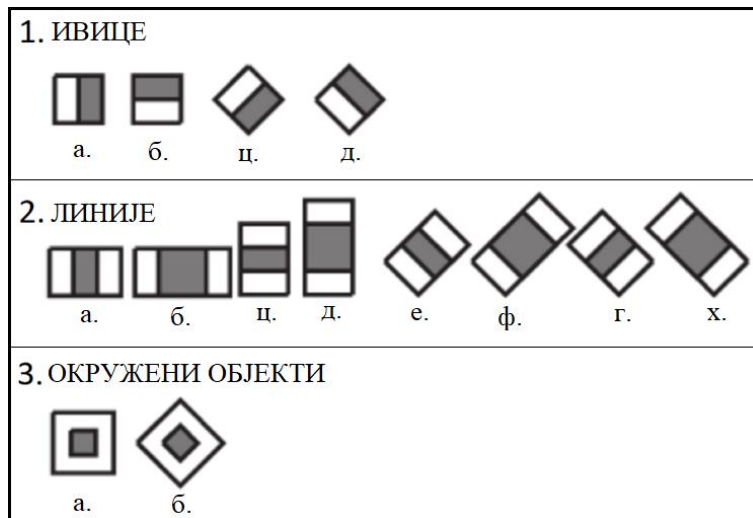
У процесу обуке овај детектор може да користи особине *Haar* [78], *Histograms of Oriented Gradient (HOG)* [79], или *Local Binary Pattern (LBP)* [80] модела.

4.6.1 Детектор базиран на *Haar* моделу

Haar модел базиран је на детекцији објекта на основу промене контраста између суседних правоугаоних скупова пиксела. Варијанте контраста између скупова пиксела користе се за одређивање светлих и тамних подручја на дигиталној слици [81]. Ови скупови пиксела могу се сврстати у три групе (Слика 4.9):

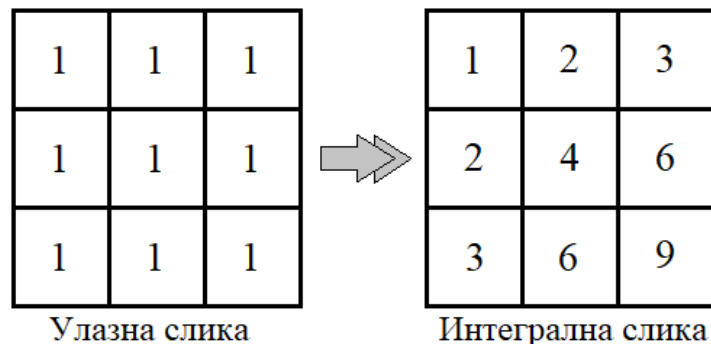
- Ивице
- Линије
- Окружени објекти

Уместо димензија улазне слике детектор мења своју величину и покреће се над истом сликом сваки пут различите величине. На овај начин могу се детектовати објекти различитих димензија.



Слика 4.9 Различити скупови пиксела код Хагг модели

У првом кораку класификатора улазна слика се конвертује у интегралну слику. Креирање интегралне слике добија се као збир свих вредности пиксела до текуће врсте и колоне укључујући и вредности посматраног пиксела. На пример, за пиксел у другој врсти и другој колони (2, 2) сабирају се вредности улазног растера са следећих позиција: (1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2) (Слика 4.10).



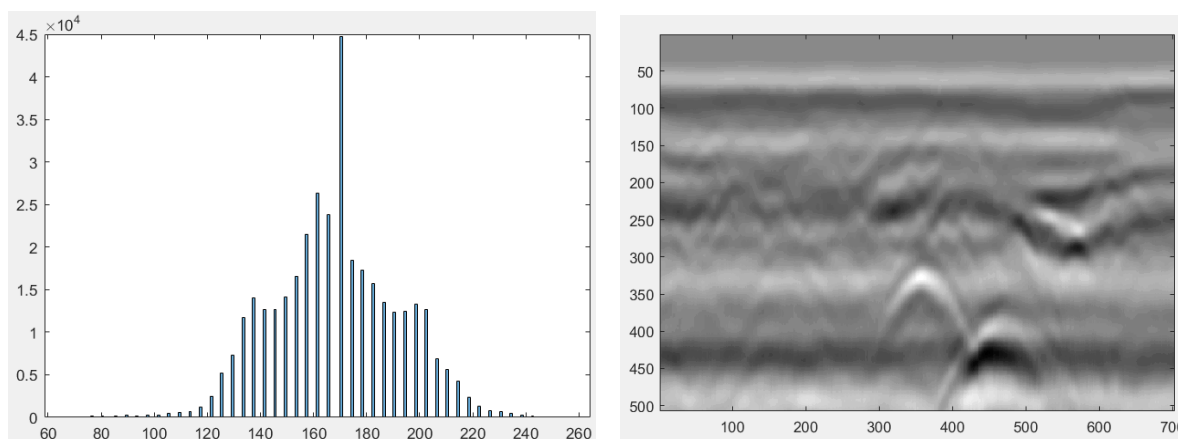
Слика 4.10 Формирање интегралне слике

Над интегралном сликом Хагг класификатор користи правоугаоне скупове пиксела који су хоризонтално и вертикално оријентисани или су заротирани за 45° (Слика 4.9). Овакав приступ омогућује једноставно сабирање вредности пиксела унутар правоугаоних сегмената слике, након чега се врши одузимање збира пиксела унутар белих сегмената од збира пиксела у зони црних сегмената. Основна предност наведеног приступа огледа се у времену процесирања које минимално зависи од димензија улазних података, као и доброј детекцији објеката различитих димензија.

4.6.2 Детектор базиран на *HOG* моделу

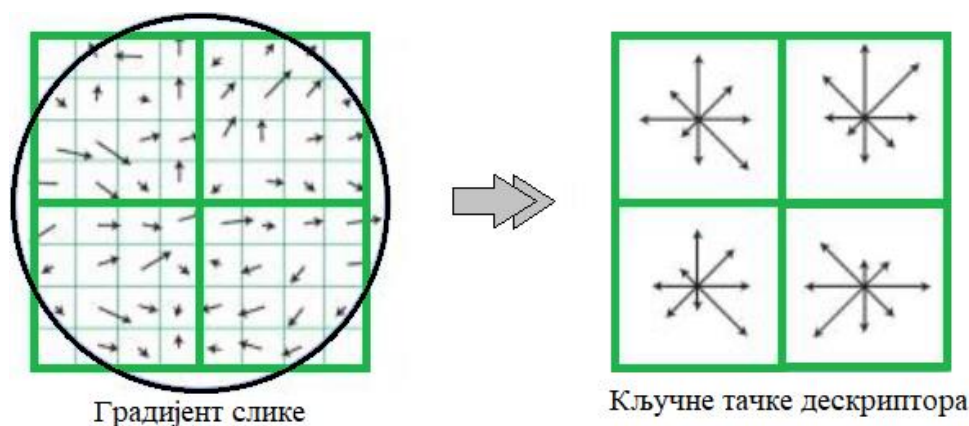
За боље разумевање *HOG* (енг. *Histogram of Oriented Gradients*) модела прво ће се дефинисати основни појмови. Хистограм у општем смислу представља

начин приказивања података распоређених у одређене категорије или групе. Уколико се посматра хистограм дигиталне слике он заправо приказује број пиксела који има одређену (исту) вредност. За креирање хистограма прво се на апсцису нанесу све потенцијалне вредности пиксела (нпр. 255 ако се ради о осмобитном запису вредности сваког пиксела на слици). Након тога се број пиксела који одговара сваком од тих интервала црта као хоризонтална линија. Ово је разлог због кога се хистограм обликује у стубичасти граф (Слика 4.11, лево). Део хистограма где је смештен највећи број вредности осветљења назива се распон тонова. За радарграм са Слика 4.11 то је распон са вредностима пиксела од 120-220 (8-битна вредност пиксела).



Слика 4.11 Хистограм (лево) за приказани радарграм (десно)

Хистограм оријентисаних градијената описује карактеристике објеката од интереса. Примењује се у процесирању слике као и у CV библиотекма у циљу детекције објеката од интереса. Хистограм оријентисаних градијената заснива се на томе да се појава локалног објекта или његов облик могу описати преко распореда интензитета градијента или праваца ивичних пиксела [82]. За његову имплементацију оригинална слика се дели на мање повезане регионе (ћелије). За сваку ћелију рачуна се хистограм правца градијента или оријентација ивица за пикселе који се налазе унутар ћелије. Комбинација ових пиксела представља дескриптор (Слика 4.12, десно).



Слика 4.12 Дескриптори хистограма оријентисаних градијената

За сваки пиксел градијентне слике рачуна се промена интензитета исте тачке у оригиналној слици, у задатом правцу (Слика 4.13). Хоризонтални f_a и вертикални градијент f_b израчунавају се коришћењем одговарајућих маски над *grayscale* сликом. Употреба сложене маске смањује перформансе алгоритма, тако да се најчешће примењују ова два градијента. Њихово израчунавање се врши према следећим изразима:

$$f_a(a, b) = I(a + 1, b) - I(a - 1, b) \quad \forall a, \quad (4.1)$$

$$f_b(a, b) = I(a, b + 1) - I(a, b - 1) \quad \forall a, b \quad (4.2)$$

Где је:

$I(a, b)$ - интензитет пиксела

Прорачун оријентације хистограма може да се врши коришћењем хоризонталног и вертикалног градијента. Величина (m) и оријентација (θ) градијента врши се на следећи начин [83]:

$$m(a, b) = \sqrt{f_a(a, b)^2 + f_b(a, b)^2} \quad (4.3)$$

$$\theta(a, b) = \tan^{-1} \left(\frac{f_b(a, b)}{f_a(a, b)} \right) \quad (4.4)$$

Угао оријентације $\theta(a, b)$ дели се са величином градијента (m) на различите интервале како би се формирала оријентација хистограма за сваку ћелију. Додатни детаљи о прорачуну градијента и оријентацији могу се наћи у подпоглављу „4.9.2 Градијентни оператори“.

У циљу побољшања перформанси, контрасти локалних хистограма могу бити нормализовани. То је могуће извршити рачунањем интензитета преко већег региона слике (блок), а затим применом нормализације над свим ћелијама унутар блока [79], према следећем изразу:

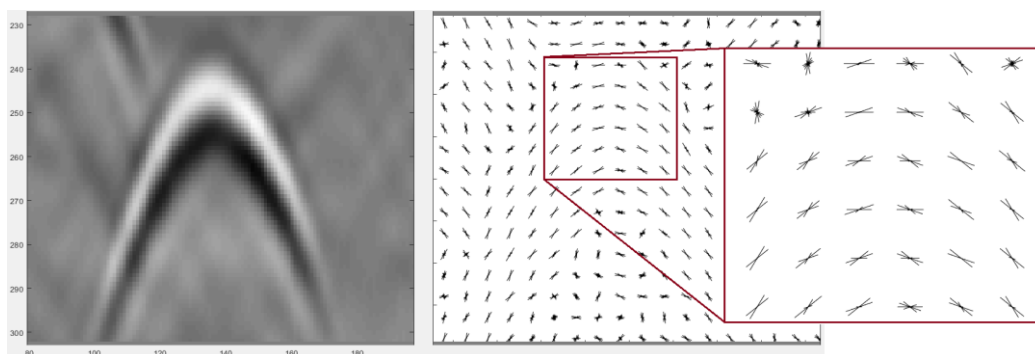
$$P(ij)_{n,b,m} = \frac{P(ij)_{n,b,m}}{\sqrt{|\vartheta|^2 + \varepsilon}} (\varepsilon = 1) \quad (4.5)$$

Где је:

$P(ij)$ - блок у тачки (i, j)

ε - константа нормализације

ϑ - нормализован хистограм



Слика 4.13 Хистограм оријентисаних градијената на делу радарграма

4.6.3 Детектор базиран на *LBP* моделу

Local Binary Pattern (LBP) представља још једну врсту дескриптора који се користи код класификације у *CV*. *LBP* представља посебан случај модела *Texture Spectrum* предложеног 1990. године [84], који је први пут описан 1994. године [85]. Формирање локалног бинарног шаблона врши се на следећи начин:

- Централни пиксел субматрице димензија 3×3 пореди своју вредност са вредностима околних пиксела, кружним редоследом у смеру кретања казаљке на сату или обрнуто.
- Уколико је вредност неког од суседних пиксела већа од вредности централног пиксела посматране субматрице на то место се уписује 1, у супротном на то место уписује се 0.

На овај начин добија се бинарни осмоцифрен број (израз 4.6), који се ради једноставнијег поређења претвара у децимални облик (Слика 4.14).

$$LBP_{P,R}(x_c, y_c) = \sum_{P=0}^{P-1} S(I_P - I_c) 2^P \quad (4.6)$$

Где је:

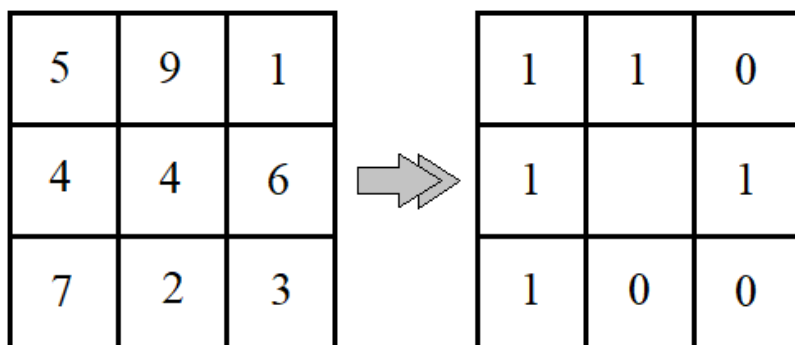
I_P - интензитет суседних пиксела

I_c - интензитет централног пиксела

Функција $S(a)$ која се користи у *LBP* оператору је описана следећим изразом [83]:

$$S(a) = \begin{cases} 0, & a < 0 \\ 1, & a \geq 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Добијени подаци се даље процесирају у циљу репрезентације регије од интереса [86]–[88].



Бинарни запис: 11010011

Децимални запис: 211

Слика 4.14 Принцип формирања бинарног и децималног броја у *LBP* моделу

Неколико побољшања изворног *LBP* модела предложили су аутори у раду [89].

4.6.4 Резиме

Преко интегралне слике *Haar* модели се могу брзо срачунати и могу бити скалирани независно по оба правца (ширини или висини). На тај начин се формира линеарно независна основа корисних објеката за анализу мањих оквира. *Haar* и *LBP* модели се успешно користе у сложеним задацима попут детекције лица [78], [90]. *Haar* и *LBP* модели боље функционишу код објеката са финим структурама, за разлику од *HOG* модела који је често коришћен у детекцији објеката попут људи и возила [91]. Међутим, у раду [92] успешно комбинују *Haar* и *LBP* модел за детекцију људи. *HOG* модел је користан за регистрацију укупног облика објекта од интереса, попут комплетног обрису хиперболичне рефлексije. На основу наведених особина очекује се бољи резултат детекције хиперболичних рефлексija применом *HOG* модела. Такође, утврђено је да се знатно побољшава успешност детекције у појединим скуповима података када се *LBP* комбинује са *HOG* моделом [92].

4.7 Вештачке неуронске мреже

Вештачка неуронска мрежа (енг. *Artificial Neural Networks, ANN*), представља модел машинског учења инспирисан мрежама биолошких неурона који постоје у људском мозгу. Изненађујућа је чињеница да вештачке неуронске мреже постоје још од 1943. године, када су први пут представљене од стране неурофизиолога *Warren McCulloch*-а и математичара *Walter Pitts*-а [93]. Они су представили прву архитектуру вештачке неуронске мреже као поједностављен математички модел који за обављање сложених рачунских операција користи логику засновану на тврдњама. Међутим, након овог открића наступа период стагнације истраживања вештачких неуронских мрежа, све до осамдесетих година, када су откривене/развијене нове архитектуре и развијене боље технике обуке. Напредак у развоју је и даље био прилично спор, али је талас занимања за истраживање вештачких неуронских мрежа порастао крајем деветнаестог и почетком двадесетог века. Постоји неколико разлога зашто је ово интересовање порасло, а неки од њих су следећи [94]:

- Сада на располагању постоје велике количине података за обуку неуронских мрежа, које својим резултатима често надмашују друге технике машинског учења, нарочито код обимних и сложених проблема.
- Нагли пораст у перформансама рачунара данас омогућава обуку великих неуронских мрежа у разумном времену.
- Побољшани су алгоритми за обуку.

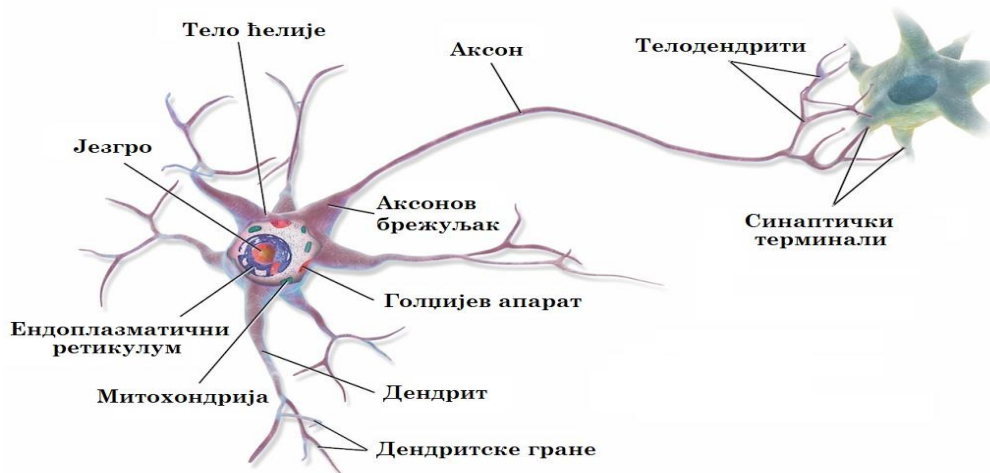
Наведени разлози су само неки који утичу на повећано интересовање и примену вештачких неуронских мрежа у разним областима.

4.7.1 Биолошки неурони

Биолошки неурон (Слика 4.15) представља ћелију која се састоји од:

- Тела ћелије - која садржи језгро и највећи део осталих сложених компоненти ћелије,
- Више гранастих израслина (дендрита) и
- Једну дугачку израслину (аксон).

Биолошки неурони производе кратке електричне импулсе (акционе потенцијале/сигнале) који путују дуж аксона и чине да синапсе које се налазе на крајевима телендрита (након аксома), шаљу хемијске сигнале - неуротрансмитере. На Слици 4.15 приказана је структура појединачних биолошких неурона, који су организовани у обимне мреже од више милијарди, у којима је сваки неурон обично повезан са хиљадама других неурона.



Слика 4.15 Биолошки неурон¹⁶

4.7.2 Од биолошких до вештачких неурона

Модел биолошког неурона (касније познат као вештачки неурон), кога су предложили *Warren McCulloch* и *Walter Pitts* је врло једноставан. Састоји се од једног или више бинарних улаза и једног бинарног излаза. Овако креиран вештачки неурон активира свој излаз када је активиран одређен број његових улаза [94].

За разлику од људског мозга који у процесу учења чува знање, рачунар користи меморију за складиштење нових информација. Уопште узевши, може се рећи да се у оба случаја чувају нове информације, али су њихови механизми различити. Рачунар информације складишти на једном делу локацијске меморије, док људски мозак мења везу неурона. Људски мозак је сачињен од мреже неурона и њихових међусобних асоцијација на основу којих се формира специфична информација. Сам неурон не поседује могућност складиштења информација.

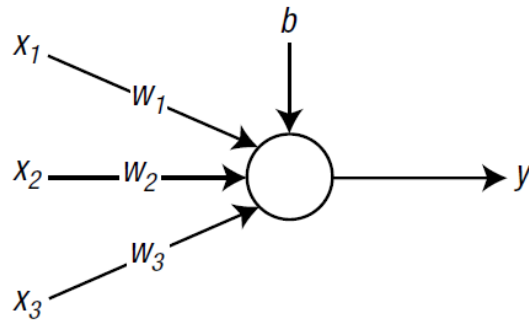
Вештачка неуронска мрежа опонаша асоцијацију неурона користећи вредност тежине везе. Аналогија између људског мозга и вештачке неуронске мреже приказана је у следећој табели [95].

Табела 4.2 Аналогија између људског мозга и вештачке неуронске мреже

<i>Људски мозак</i>	<i>Вештачке неуронске мреже</i>
<i>Неурон</i>	Чвор
<i>Везе између неурона</i>	Тежина везе

Пример једног чвора вештачке неуронске мреже са три улаза и једним излазом приказан је на Слици 4.16. Вредности X_1 , X_2 и X_3 представљају улазне сигнале а W_1 , W_2 и W_3 тежине одговарајућих улазних сигнала, док вредност b представља повезан фактор са складиштењем информација (пондерисана вредност).

¹⁶ <https://www.mikroknjiga.rs/Knjige/MU/slike/1001.jpg>, [датум приступа: 12.07.2020.]

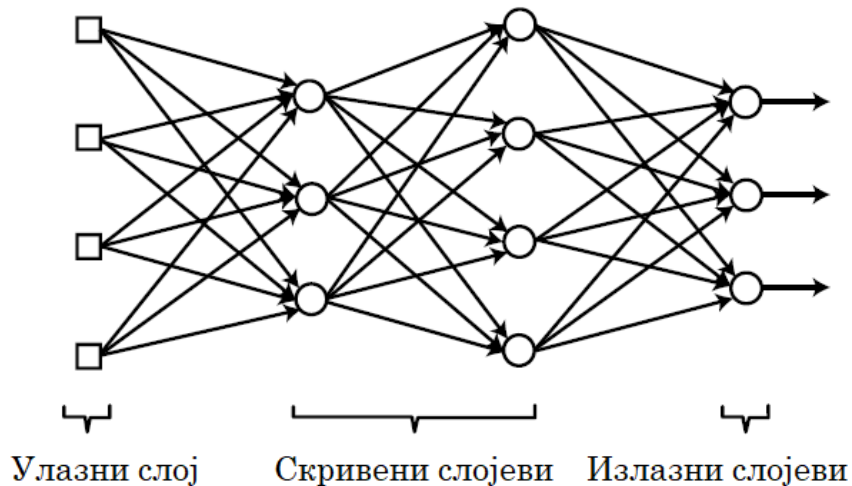


Слика 4.16 Чвор вештачке неуронске мреже са три улаза и једним излазом

Сваки од улазних сигнала се множи са одговарајућом тежином. Срачунате вредности се сабирају унутар чвора. Следи да сигнал са већом тежином има већи утицај у оквиру излазног сигнала.

4.7.3 Слојеви вештачке неуронске мреже

Неуронска мрежа је сачињена од мреже чворова. У зависности од начина везе између чворова могу се креирати различите неуронске мреже. Један од најчешће примењиваних типова вештачких неуронских мрежа користи слојевиту структуру чворова. Овај тип везе приказан је на Слици 4.17.



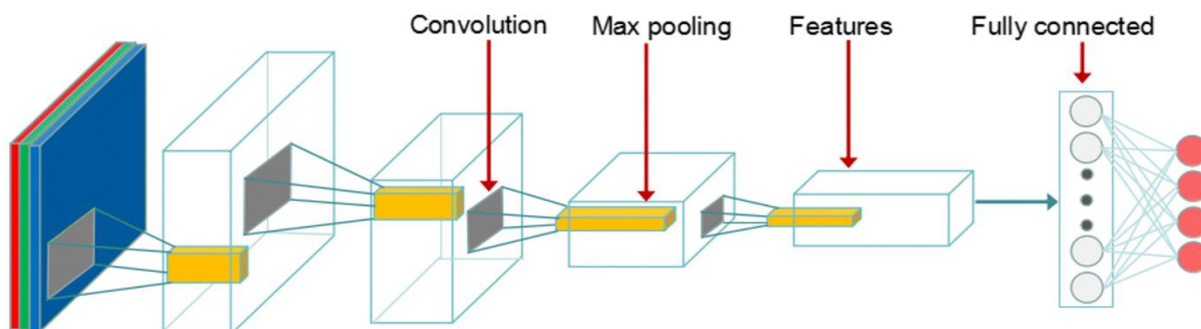
Слика 4.17 Слојевита структура вештачке неуронске мреже

Улазни слојеви приказани су као квадрати, а на супрот њима, група крајњих десних чворова означава излазни слој. Излаз из тих чворова представља уједно и коначан резултат примене вештачке неуронске мреже. Сви чворови који се налазе између ова два слоја представљају скривене слојеве (енг. *hidden layers*). Ови слојеви се називају скривени, јер њихов резултат није доступан изван вештачке неуронске мреже. У почетку развоја неуронских мрежа архитектура је била врло једноставна, сачињена од само улазних и излазних слојева (једнослојне неуронске мреже). Додавањем једног скривеног слоја настале су плитке неуронске мреже. За разлику од њих, мрежа са два и више скривених слојева назива се вишеслојна или дубока неуронска мрежа [95].

4.8 Конволуционе неуронске мреже

Конволуционе неуронске мреже (енг. *Convolution Neural Network, CNN*) представљају најрепрезентативнији модел дубоких неуронских мрежа [96]. Ове мреже проналазе примену у свим областима наведеним у Поглављу 4.5. Сам назив „конволуционе неуронске мреже“ потиче од математичке операције „конволуција“. У општем смислу конволуционе неуронске мреже се дефинишу као класичне неуронске мреже које операцију конволуције примењују на барем једном слоју. Вештачке неуронске мреже чине само језгро дубоког учења (енг. *Deep Learning*) [94]. Експеримент *Hubela i Wiesel 1981.* године представља основе разумевања начина на који неурони извлаче сложене информације из узорка светлости, како би се конструисала слика. Својим истраживањем доказали су да су неурони организовани у прецизној архитектури тако што су станице са сличним функцијама организоване у колоне, које информације прослеђују на више нивое мозга где се формира слика. Ови докази били су основна инспирација у даљем развоју конволуционих неуронских мрежа које представљају најпопуларнију архитектуру дубоких неуронских мрежа. У последњој деценији ове мреже заузимају примарну улогу у решавању бројних проблема и задатака из области *CV*, обраде говора и разним другим областима [97].

Структуру конволуционе неуронске мреже чини неколико градивних блокова који представљају слојеве ове мреже. У зависности од архитектуре број слојева и градивних блокова може да варира. Сваки слој врши трансформацију резултата из претходног слоја помоћу одговарајућих диференцијалних једначина и генерише излаз под називом *Feature maps* [98]. На Слици 4.18 приказана је конволуциона неуронска мрежа сачињена од следећих слојева: улазни слој, конволуциони слој (енг. *convolutional layer*), слој сажимања (енг. *pooling layer*), активациона функција (енг. *activation function*) и потпуно повезани слојеви (енг. *Fully Connected Layer - FC layer*).



Слика 4.18 Основне компоненте конволуционе неуронске мреже (поједностављен модел)

Конволуциона неуронска мрежа може да буде сачињена од више различитих слојева од којих се неки могу и понављати унутар модела. У наставку рада

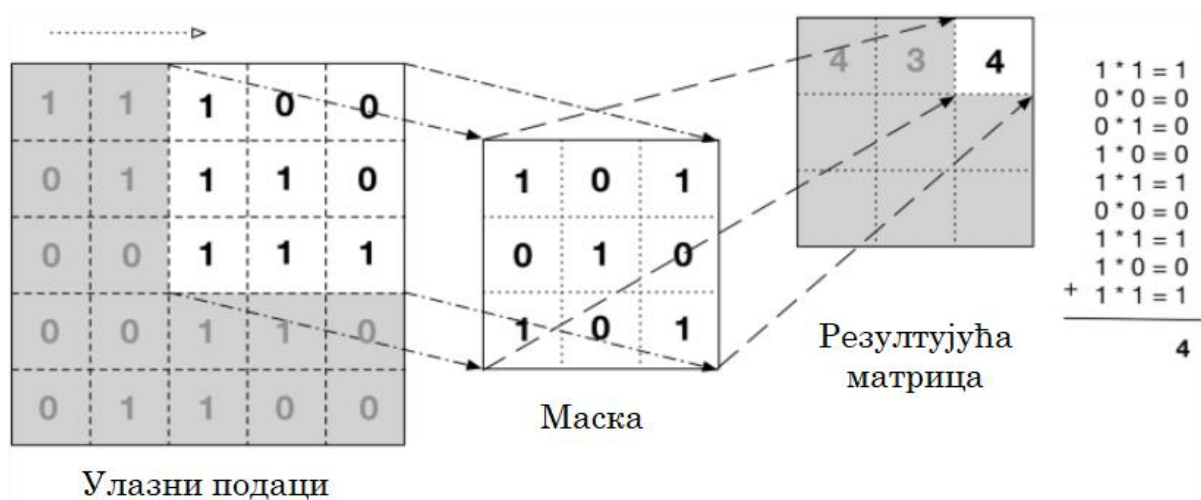
биће описани неки од најчешћих слојева који чине саставне елементе конволуционе неуронске мреже.

4.8.1 Улазни слој

У општем смислу улазни слој се не односи директно на архитектуру конволуционе неуронске мреже. Овај слој се примењује на сваку неуронску мрежу а преко њега се подаци уводе у неуронску мрежу.

4.8.2 Слој конволуције

Основна разлика *CNN* у односу на друге типове неуронских мрежа огледа се у слоју конволуције. Конволуциони слој (енг. *convolutional layer*) представља основни градивни блок конволуционе неуронске мреже у коме се врше захтевни прорачуни [99]. У овом слоју реализује се основна операција обучавања неурона мреже. Операција конволуције врши се на деловима улазне слике са одговарајућим конволуционим филтером (маском).



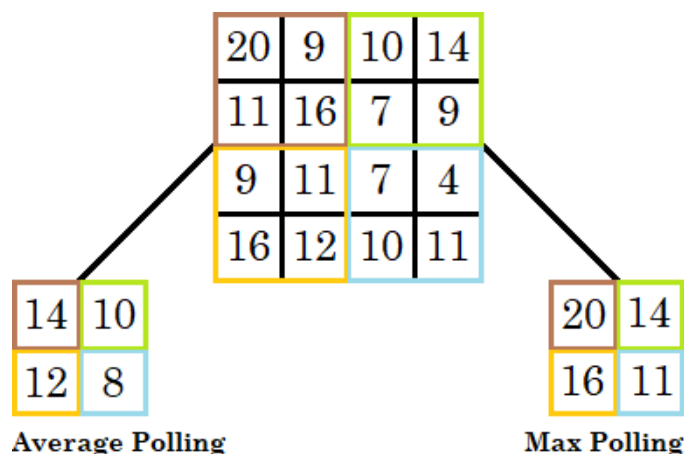
Слика 4.19 Слој конволуције у архитектури *CNN*

На Слици 4.19 приказана је улазна слика (матрица) димензија 5×5. Над њом се примењује конволуциони филтер димензија 3×3, који се итеративно помера преко улазне слике. То значи да над улазном матрицом постоји 9 различитих сегмената. Резултат конволуције за сваки сегмент уписује се у резултујућу матрицу (енг. *convoluted feature*).

4.8.3 Слој сажимања

Уобичајено је да се у архитектури *CNN* између конволуционих слојева периодично уметне слој сажимања. Овај слој најчешће примењује просечну и максималну функцију (енг. *pooling functions*), тако да се у резултујућу матрицу уписује просечна (енг. *average pooling*) или максимална (енг. *max pooling*) вредност унутар суседних субматрица које су најчешће димензија 2×2 или 3×3

(Слика 4.20). Прорачун се итеративно помера преко елемената улазне матрице почевши од горњег левог угла до доњег десног угла.



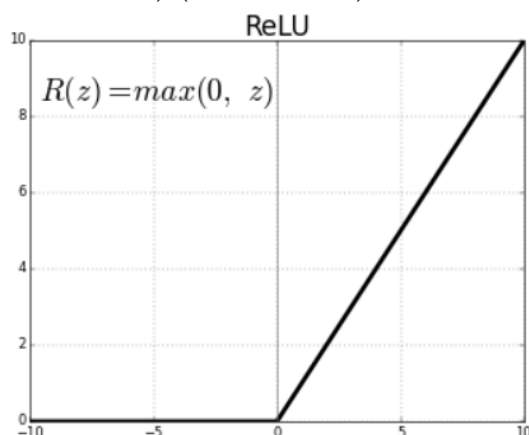
Слика 4.20 Слој сажимања у архитектури CNN

Применом операције сажимања смањује се број параметара, а самим тим и прорачуна унутар мреже. На овај начин може се контролисати претренираност (енг. *overfitting*) мреже [99].

Поред наведених функција постоје и друге попут: *Mixed Pooling* [100], *Lp Pooling* [101], *Spatial Pyramid Pooling (SPP)* [102], *Stochastic Pooling* [103].

4.8.4 Активациона функција

Активациона функција пропагира или зауставља улазну вредност у неурон у зависности од свог облика. Постоји велики број активационих функција међу којима су најпознатије линеарне, функције скока и слично. Правилан одабир активационе функције (енг. *activation function*) може значајно побољшати перформансе CNN. Једна од најчешће коришћених активационих функција је *ReLU* (енг. *Rectified Linear Unit*) (Слика 4.21).

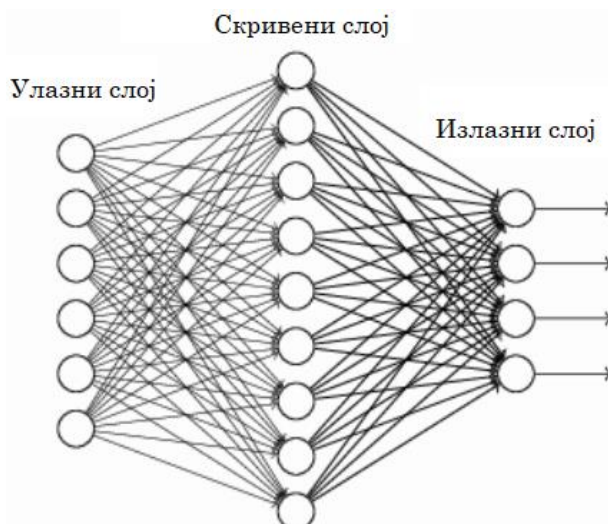


Слика 4.21 Активациона ReLU функција

Ова функција уноси нелинеарност у модел, чиме се обично постиже да модел знатно боље описује стварни објекат, с обзиром да је сваки комплексан систем у мањој или већој мери нелинеаран.

4.8.5 Потпуно повезан слој

Потпуно повезан слој подразумева везу сваког неурона са свим излазима претходног слоја (Слика 4.22). С обзиром да се након овог слоја добија излаз из мреже типично је да у архитектури ово буде последњи слој.

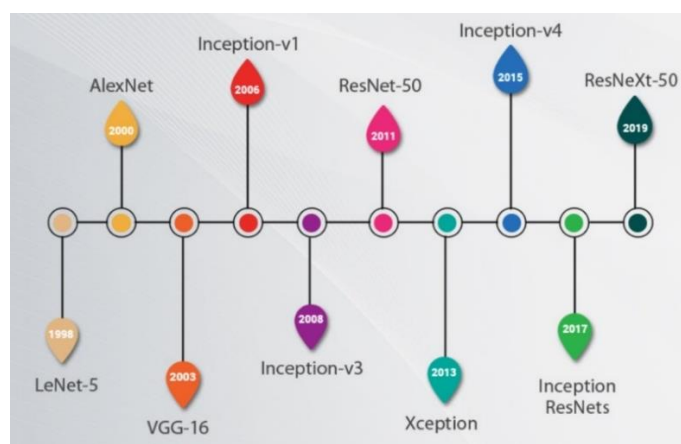


Слика 4.22 Потпуно повезан слој у архитектури CNN

У приказаном слоју налази се већина срачунатих тежина и свих неопходних информација на основу којих се може прећи на фазу учења (обуке) CNN.

4.8.6 Архитектура конволуционе неуронске мреже

Комбинацијом претходно објашњених слојева те њиховим понављањем у неколико итерација са променљивим параметрима настају различите архитектуре дубоких конволуционих неуронских мрежа. Од 1998. године настале су различите архитектуре CNN. Неке од њих су приказане на Слици 4.23.



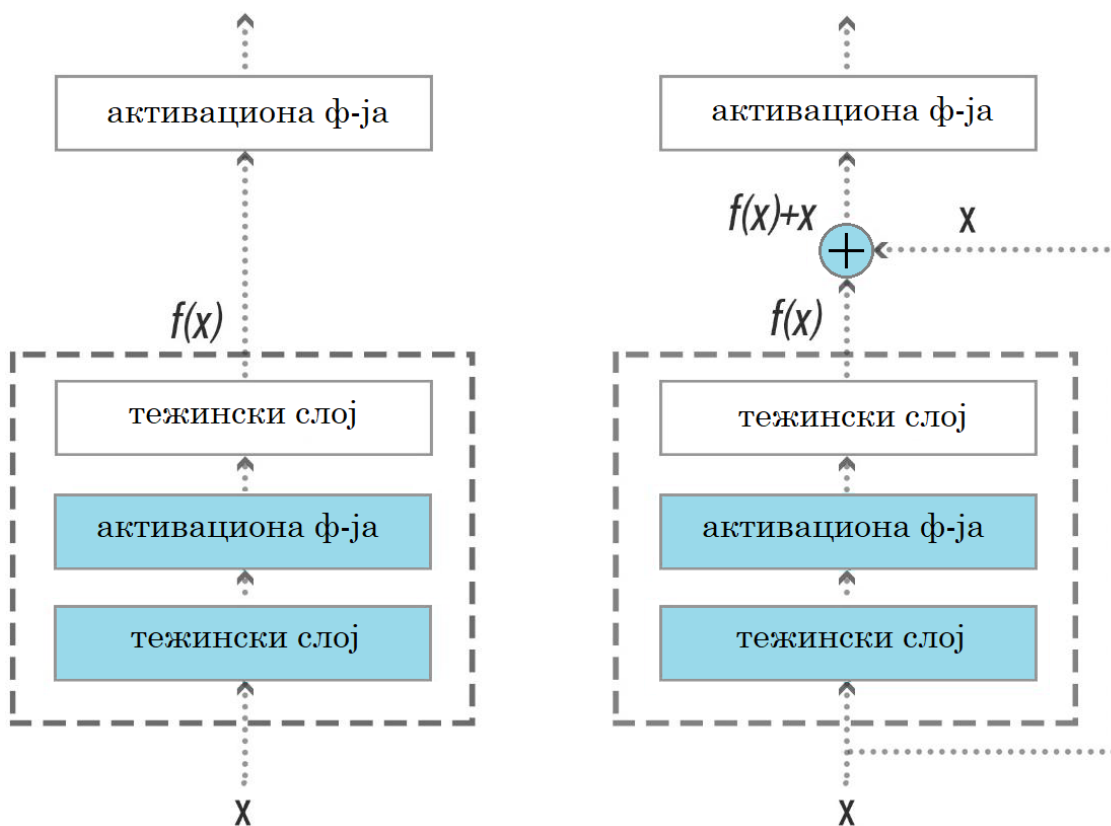
Слика 4.23 Различите архитектуре конволуционих неуронских мрежа¹⁷

¹⁷ <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2020/10/what-is-the-convolutional-neural-network-architecture/>, [датум приступа: 24.08.2021.]

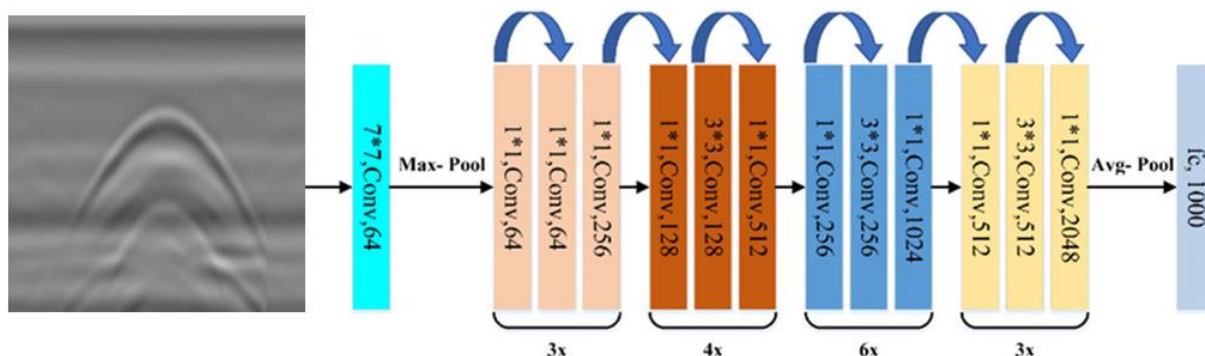
У наставку рада приказана је и објашњена архитектура *ResNet* мреже која је коришћена у практичном делу дисертације.

ResNet

ResNet архитектура имплементира јединствену идеју ткз. резидуалних блокова (енг. *Residual Neural Network*), који омогућавају тренирање веома „дубоких“ неуронских мрежа, јер овај приступ решава проблем нестајућих градијената [97]. То значи да се након сваке серије *ReLU* активационе функције улаз у операцију доводи на излаз операције (Слика 4.24, десно). Односно, рачуна се разлика промене улаза и примењених филтера како би се добила нова репрезентација на којој се даље врши процесирање. На овај начин врши се додавање на излаз већ научених тежина из претходних слојева. Неуронска мрежа тренирана методом пропације уназад ослања се на технику опадајућих градијената за проналажење оптималних вредности тежина. Код већег броја слојева, градијенти постају веома мали, што значи да се додавањем већег броја слојева не побољшава перформанса мреже. Аутори *ResNet* архитектуре уводе пречице у конекцији слојева који немају практичну улогу и који се прескачу поновним коришћењем активационе функције из претходног слоја [97]. Захваљујући овом приступу *ResNet* архитектура је на „*ILSVRS*“ такмичењу била сачињена од 152 слоја (Слика 4.25), задржавајући брзину и једноставност тренирања.



Слика 4.24 Разлика између стандардног и резидуалног блока неуронске мреже



Слика 4.25 Архитектура ResNet-50 мреже

Тренутно је ово једна од водећих архитектура конволуционих неуронских мрежа, са степеном грешке од 3.6%.

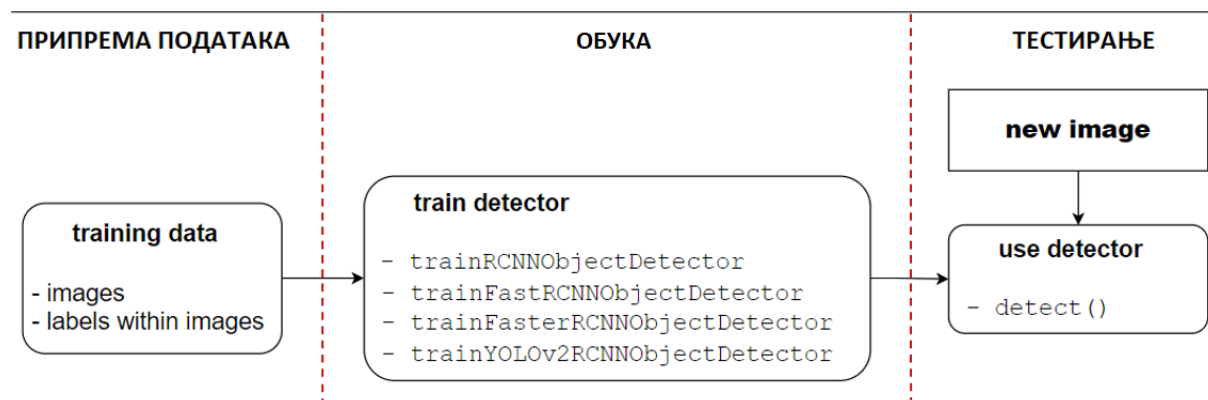
4.8.7 Процес обуке конволуционе неуронске мреже

Дубоке конволуционе неуронске мреже обично садрже велик број параметара (најчешће неколико милиона) које је потребно подесити за исправну класификацију или детекцију. Поступак подешавања ових параметара назива се учење или тренирање. Процес учења *CNN* представља итеративни поступак у коме се мрежа оспособљава да врши класификацију, локализацију, детекцију или сегментацију неког објекта од интереса. У овом поступку на улаз неуронске мреже се доводи узорак чија је вредност излазне величине позната, након чега се врши поступно подешавање тежина неурона коришћењем неког од алгоритама математичке оптимизације. Поступак се своди на претрагу n -димензионог простора параметара, где је n укупан број тежина у мрежи.

Backpropagation алгоритам је најчешће коришћен алгоритам за процес учења неуронске мреже. Алгоритам се темељи на оптимизацији градијентног спуста и једноставно се проширује и за учење конволуционе неуронске мреже. На почетку се дефинише функција критеријума, а процес учења се своди на минимизацију ове функције. Код градијентног поступка оптимизације потребно је одредити величину корака којим се врши претрага простора параметара. Премала вредност овог корака доводи до спорог процеса конвергенције, док се у случају превеликог корака могу прескочити оптималне вредности. *Backpropagation* алгоритам се у основи састоји од два корака. У првом се на улаз мреже доводи познати узорак и посматра одзив на излазу те мреже. Након тога, врши се прорачун грешке, тј. разлике између одзива мреже и очекиваног излаза. У другом кораку грешка се смањује тако што се она шири уназад ажурирајући мрежу на овај начин. Код овог алгоритма грешка се рачуна у сваком слоју те се на темељу градијената ажурирају тежине и смањује грешка неуронске мреже.

4.8.8 Детекција објеката конволуционом неуронском мрежом

У оквиру дисертације од интереса је детекција хиперболичних рефлексивних рефлексија. То значи да није неопходно бавити се алгоритмима за класификацију него алгоритмима за детекцију објеката. Такође, треба водити рачуна да на једном радарграму може да постоји и више хиперболичних рефлексивних рефлексија које алгоритам треба детектовати. Уопштени процес детекције објеката користећи дубоке неуронске мреже приказан је на Слици 4.26. Овај процес се састоји из три основне целине: припрема података, обука и тестирање.



Слика 4.26 Workflow за обуку и њену примену над тест подацима

Припрема података. У овој фази, поред слика које садрже објекат од интереса, потребно је формирати и оквири у којима се ти објекти налазе. Ови оквири се дефинишу преко координата горњег левог угла (индекс врсте и колоне), ширине и висине. Резултат припрема података уједно представља и улазне податке за фазу обуке.

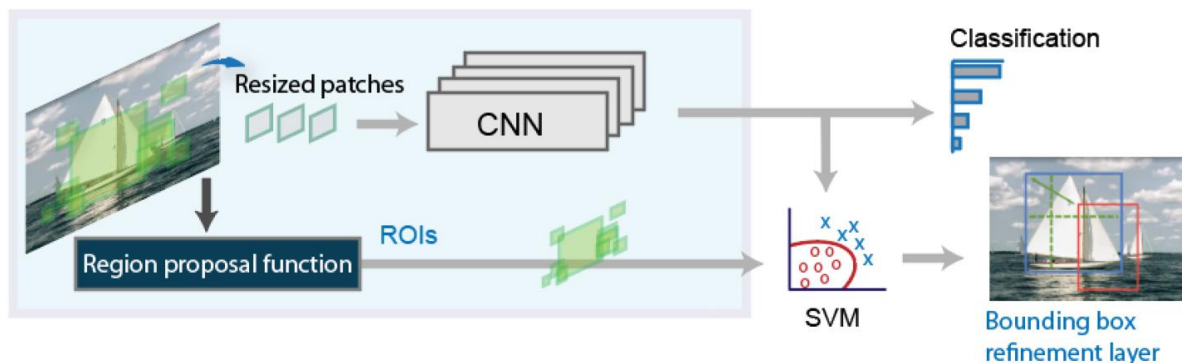
Обука. Ова фаза подразумева обуку детектора у циљу препознавања објекта од интереса. Обука се најчешће врши са 60% насумично одабраних слика из улазног сета података, док се остали подаци користе за тестирање и валидацију. За процес обуке може се користити неколико различитих модела. У основи је развијен *R-CNN*, који се временом допуњавао и мењао у циљу постизања бољих резултата и перформанси од претходног модел, тако да тренутно постоје: *R-CNN*, *Fast R-CNN*, *Faster R-CNN*, *YOLO*.

Тестирање. У фази тестирања примењује се детектор над сликама које не фигуришу у фази обуке.

4.8.8.1 *R-CNN* детектор

R-CNN (*Region Based Convolutional Neural Networks*) је детектор који генерише предлог региона у којима се налазе објекти од интереса [104]. На Слици 4.27 је дат шематски приказ примене *CNN*, *SVM* у циљу детекције објеката на слици. На приказаном примеру помоћу конволуционе неуронске

мреже обезбеђена је и класификација објекта у више класа, што у тренутној области истраживања није неопходно.



Слика 4.27 Шематски приказ *R-CNN* модела [104]

Резултат примене *R-CNN* детектора представљају зоне које потенцијално садрже објекат од интереса. У ту сврху користи се селективни алгоритам претраживања који се одликује следећим карактеристикама [105]:

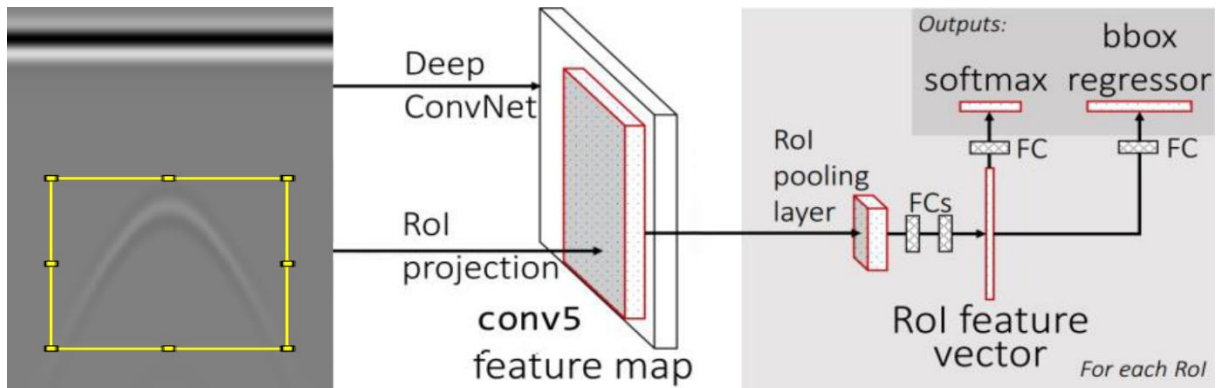
1. Све величине објеката на слици се узимају у обзир.
2. Због различите боје, текстуре, сенке и слично стратегија за груписање регија мора бити разноврсна.
3. Ради се са коначним бројем потенцијалних зона објеката (2000).

Предлог 2000 регија које ће бити анализирани врши се помоћу алгоритма за селективно претраживање, након чега се примењује алгоритам за рекурзивно комбиновање који сличне регије спаја у веће.

Са тренутним карактеристикама рачунара применом *R-CNN* алгоритма не постиже се обрада у реалном или блиско реалном времену. Да би се превасходно овај недостатак превазишао развијен се нови алгоритам под називом *Fast R-CNN*.

4.8.8.2 *Fast R-CNN* детектор

Овај алгоритам „поправља“ неке од недостатака *R-CNN* алгоритма повећавајући брзину процесирања и тачност детекције. На улаз конволуционе неуронске мреже доводе се предложене регије са сликом док се излаз прослеђује на слој сажимања регија од интереса (енг. *ROI pool* или *ROI pooling layer*) (Слика 4.28). Улаз потпуно повезаног слоја мреже захтева исту величину свих региона. Из тог разлога *ROI pool* на излазу обезбеђује исту величину свих региона. Преко срачунатих вредности вероватноће у потпуно повезаном слоју одлучује се да ли издвојени регион садржи или не садржи објекат од интереса. Уместо тренирања линеарног *SVM*-а користи се *softmax* класификатор. Применом овог класификатора добијају се бољи резултати и након само једне фазе тренирања [106]. Завршни корак подразумева регресију величине региона (Слика 4.28).



Слика 4.28 Шематски приказ *Fast R-CNN* модела

Применом *Faster R-CNN* поступак обуке и тестирања траје знатно мање у поређењу са *R-CNN* (Слика 4.27). Основни разлог бржег процесирања огледа се у чињеници да не захтева поновни унос регија у конволуциону неуронску мрежу.

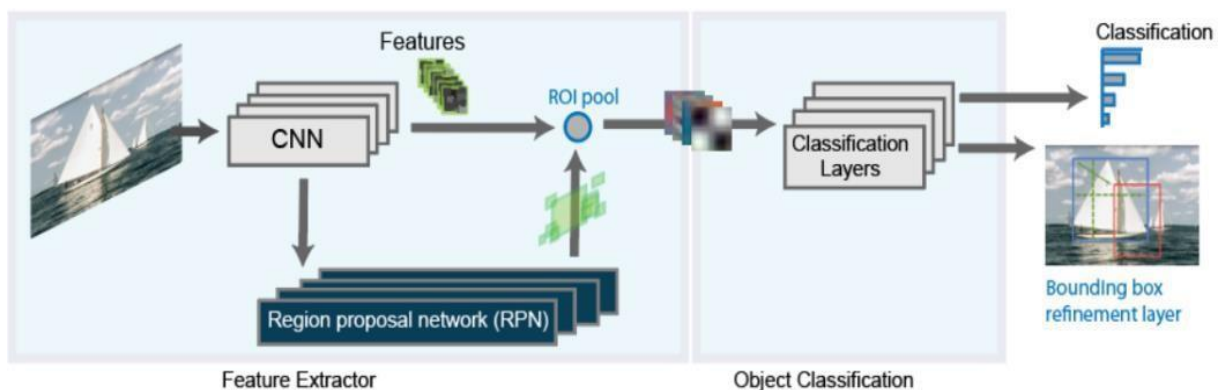
4.8.8.3 *Faster R-CNN* детектор

У претходном подпоглављу показано је да је *Fast R-CNN* знатно бржи у поређењу са *R-CNN* моделом детекције. Међутим, брзина тестирања и даље не спада у домен обраде у реалном времену, с обзиром да је за слику 500×500 пиксела у просеку потребно 2 секунде. Наведени проблем се превазилази новим моделом под називом *Faster R-CNN*, који брзину тестирања своди на 0.2 секунде (Слика 4.29). Ова брзина се постиже елиминацијом селективне претраге која представља спор и дуготрајан процес.

Faster R-CNN се састоји од два модула [107]:

1. Дубока неуронска мрежа која предлаже регије и
2. Детектор који користи предложене регије.

Уместо коришћења селективног претраживања овај модел користи засебну мрежу за предвиђање регија, при чему се најчешће користи помични прозор претраге 3×3 пиксела. Предложене регије се даље доводе на *ROI pool*, где се врши класификација региона и регресија величине издвојених зона.



Слика 4.29 Шематски приказ *Faster R-CNN* модела [104], [108]

4.8.8.4 YOLO детектор

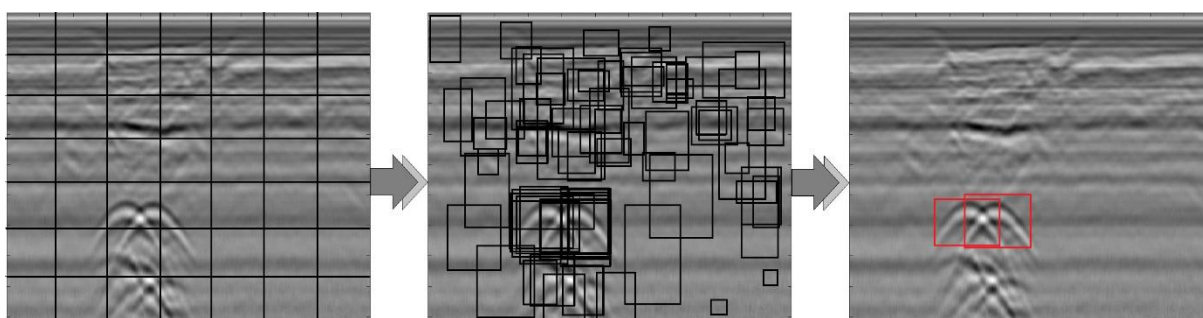
Алгоритми за детекцију објеката који су објашњени у претходним поглављима базирани су на формирању детектора на основу којих се врши процена делова слике који потенцијално садрже објекат од интереса. *YOLO* (енг. *You Only Look Once*) алгоритам се разликује по томе што слику „погледа“ само једном. Једна конволуциона мрежа задужена је за предвиђање више граничних оквира у којима се потенцијално налазе објекти од интереса. Обука мреже врши се над комплетним сликама. Основна мрежа у просеку обрађује 45 слика по секунди, тако да и овај алгоритам спада у групу процесирања у реалном/блиско реалном времену. За разлику од „клизних“ прозора *YOLO* алгоритам анализира целу слику па самим тим имплицитно кодира информације о класама и њиховом изгледу.

У циљу детекције објеката од интереса алгоритам се састоји из неколико корака [109] (Слика 4.30):

1. Улазна слика се дели на мрежу димензија $S \times S$,
2. Сваком оквиру додељује се пет вредности $(x, y, w, h, conf)$,

Где је:

- x, y – координате центра оквира у односу на граничну ћелију мреже,
 - w, h – представљају ширину и висину у односу на целу слику и
 - $conf$ – вероватноћа да анализирани регион садржи објекат од интереса.
3. Врши се прорачун са којом условном вероватноћом анализирани регион садржи објекат од интереса и
 4. Условна вероватноћа се множи **средиктивном** вероватноћом при чему се добија резултат поверења за анализирани регион.



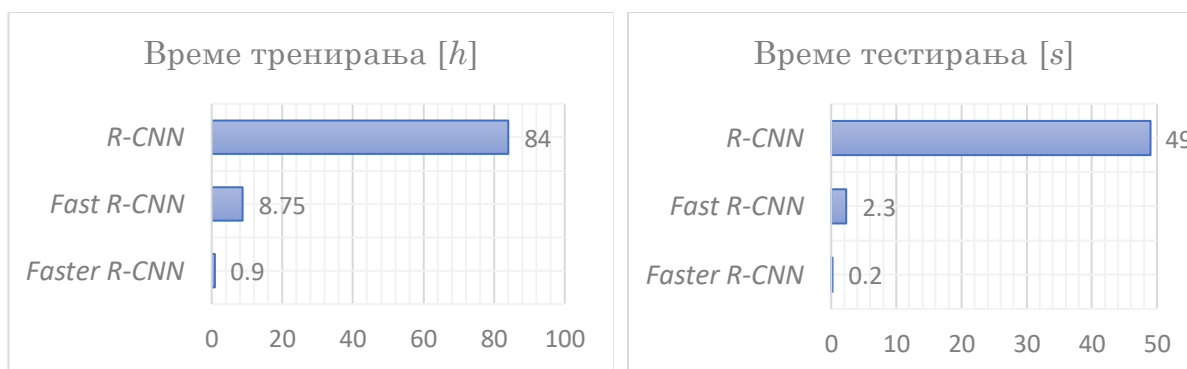
Слика 4.30 Шематски приказ рада *YOLO* алгоритма

YOLO архитектура се ослања на конволуциону неуронску мрежу од 24 конволуциона слоја заједно са два потпуно повезана слоја. С обзиром на начин рада код овог модела врши се предикција великог броја региона, који често не садрже објекте од интереса. Из тог разлога *NMS* (енг. *Non-Maximum Suppression*) метода се примењује на самом крају мреже ради повезивања региона који се у великој мери преклапају [97]. Када је у питању тачност детекције овај алгоритам заостаје за појединим алгоритмима [110].

4.8.8.5 Резиме

Дубоке неуронске мреже имају велику примену у различитим областима. Кроз ово поглавље дат је преглед развоја конволуционих неуронских мрежа и њене примене за поступак класификације, локализације и детекције објеката, са акцентом на детекцију. Од новембра 2013. године до средине 2015. за детекцију објеката на дигиталним сликама развијена су три основна модела базирана на конволуционим неуронским мрежама: *R-CNN*, *Fast R-CNN*, *Faster R-CNN*. Основна идеја развоја сваког новог модела у основи је задржати исти квалитет детекције и скратити време обуке и тестирања.

Fast R-CNN модел се примењује знатно брже у односу на *R-CNN*. Сlike се обрађују за око 146 пута брже, а време тренирања (обуке) је за око 9 пута брже (Слика 4.31) [106]. Такође, време обуке код *Faster R-CNN* модела се скраћује за око 10 пута у односу на *Fast R-CNN*, а и време тестирања је за око 10 пута мање.



Слика 4.31 Време обуке и време процесирања код *R-CNN*, *Fast R-CNN* и *Faster R-CNN* модела [105]

На основу претходне анализе закључује се да је за примену конволуционих неуронских мрежа код детекције објеката у реалном и блиско реалном времену неопходно користити модел *Faster R-CNN*.

Поред наведених модела у оквиру овог поглавља анализиран је и *YOLO* детектор. На основу спроведене анализе уочено је да и овај алгоритам проналази своју примену код детекције објеката у реалном и блиско реалном времену. Међутим, тачност детекције овог алгоритма није на завидном нивоу [110], што представља основни разлог за његову елиминацију у даљем развоју алгоритма за детекцију хиперболичних рефлексија на радарграмима.

Истраживања спроведена током 2015. године [111], [112], показала су да је дубина мреже од пресудног значаја за добијање добрих резултата, тако да се у фази обуке предлажу дубоки модели у просеку од 16-30 слојева [111], [113].

4.9 Детекција ивица

За финално усвајање координата темена и тачака на крацима хиперболичних рефлексија у оквиру овог поглавља анализирају се алгоритми за детекцију ивица. Поступак детекције ивица спада у један од основних метода у рачунарској обради слике [114] и има важну улогу код препознавања објеката. Основна примена детекције ивичних пиксела огледа се у значајној сегментацији улазних података, при чему се задржавају структурне особине слике за даљу обраду. Детекција ивичних пиксела има практичну примену у различитим областима, као што су: анализа медицинских снимака, препознавање карактеристичних објеката у сателитским снимцима [115], аутоматска контрола и надзор саобраћаја, препознавање контура лица или отиска прста [116], [117]. У постојећој литератури постоји неколико различитих дефиниција ивице и ивичних пиксела у обради слике:

Према [118], ивица је скуп повезаних пиксела на слици који се налазе на граници између два различита региона. Под различитим регионом мисли се на мање или веће промене интензитета пиксела или текстуре који карактеришу поједине сегменте слике. У том контексту ивица представља крај једног и почетак другог региона или контуру преко које се интензитет суседних пиксела нагло мења [119]. Према [120] ивица се односи на сет пиксела чији се интензитет сиве или градијент¹⁸ нагло мења и обично има линеарну особину.

Детекција ивичних пиксела представља процес препознавања и лоцирања „оштрих“ дисконтинуитета на слици. Ови дисконтинуитети огледају се у наглим променама интензитета пиксела што указује на крај једне и почетак друге регије на слици [121].

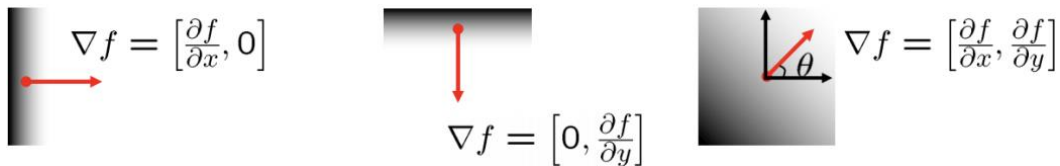
Сходно наведеним дефиницијама, препознавање ивице заснива се на неким карактеристикама пиксела на слици, као што су: интензитет, локација или оријентација неког региона [122]–[124]. За боље препознавање ивичних пиксела, одређују се промене у интензитету суседних пиксела, као и наглашавање пиксела код којих постоји значајна промена у вредности локалног интензитета и израчунавање градијента [125]. За израчунавање градијента користи се набла оператор (∇), који је за 2Д простор дефинисан као (Слика 4.32):

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j \quad (4.8)$$

Резултат примене набла оператора на скаларно поље назива се градијент тог поља, а дефинисан је према следећем изразу:

$$\text{grad } f(x, y) = \nabla f(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} i + \frac{\partial f}{\partial y} j \quad (4.9)$$

¹⁸ Градијент - http://vision.stanford.edu/teaching/cs131_fall1718/files/cs131-class-notes.pdf, [датум приступа: 24.08.2020.]



Слика 4.32 Графички приказ набла оператора

Генерално, поступак детекције ивичних пиксела на слици састоји се из три основна корака:

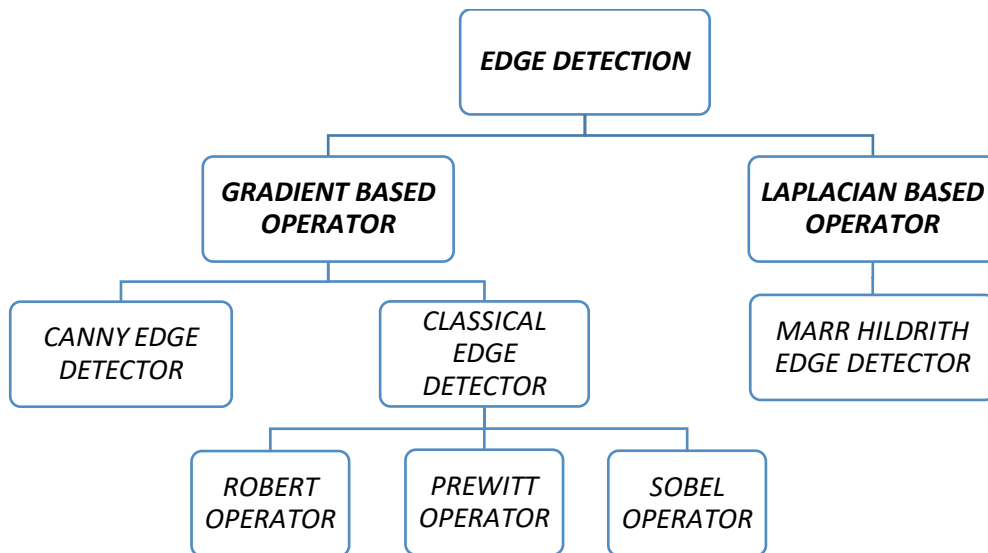
1. **Филтрирање.** Улазни подаци често садрже различите шумовове које је неопходно филтрирати. Филтрирањем се смањује степен шума, али долази и до већег губитка корисних информација [126].
2. **Детекција.** У овом кораку одређује се прелиминарни скуп ивичних тачака, при чему се најчешће користе неке граничне вредности од којих зависи степен детекције.
3. **Локализација.** Заврши корак који подразумева издвајање финалног скупа ивичних тачака и њихову локализацију на основу додатних услова [127].

На крајњи резултат детекције ивичних пиксела утиче неколико критеријума, од којих су најважнији [128]:

- **Оријентација.** Постојећи оператори одређују карактеристичан правац који је најосјетљивији за детекцију ивичних пиксела. То значи да оператор може бити оптимизован да тражи хоризонталне, вертикалне или дијагоналне ивичне пикселе.
- **Утицај шума.** У „замућеним“ и „искривљеним“ ивицама, најважнији корак је филтрирање. Код оваквих улазних података најчешће се користе оператори са већим опсегом, тако да могу довољно да смање локалне шумове. Међутим, овај начин резултује смањеном тачношћу локализације ивичних пиксела.
- **Структура.** Оператор треба да одговори исправно и код постепених промена интензитета пиксела на локалном нивоу, тако да је могуће откривање лажних и детекција стварних ивичних пиксела.
- **Време.** Обезбедити оптимални утрошак времена за примену оператора.

На основу наведеног, може се закључити да постоје различите технике за препознавање ивичних пиксела (Слика 4.33), али се већина постојећих метода може сврстати у две основне групе:

1. **Градијентни оператори.** Детекција ивичних пиксела врши се претрагом минимума и максимума по првом изводу функције дуж јединичног вектора n .
2. **Laplacian оператори.** Метод је базиран на одређивању нула другог извода функције дуж јединичног вектора n у циљу препознавања ивичних пиксела.



Слика 4.33 Различити типови оператора за детекцију ивица

Циљ сваког оператора за детекцију ивичних пиксела јесте да се избегне детекција лажних пиксела и да ивични пиксели што мање одступају од стварног положаја на слици [129]. У наставку ће бити приказане неке од најважнијих особина сваког од оператора са Сlike 4.33.

4.9.1 *Laplacian* оператори

Оператори из ове групе за проналазак ивичних пиксела користе други извод. Ови оператори имају два основна ограничења:

- а) Повећана вероватноћа детекције лажних ивица и
- б) Грешка локализације на закривљеним ивицама се може повећати.

4.9.1.1 *Marr Hildreth*

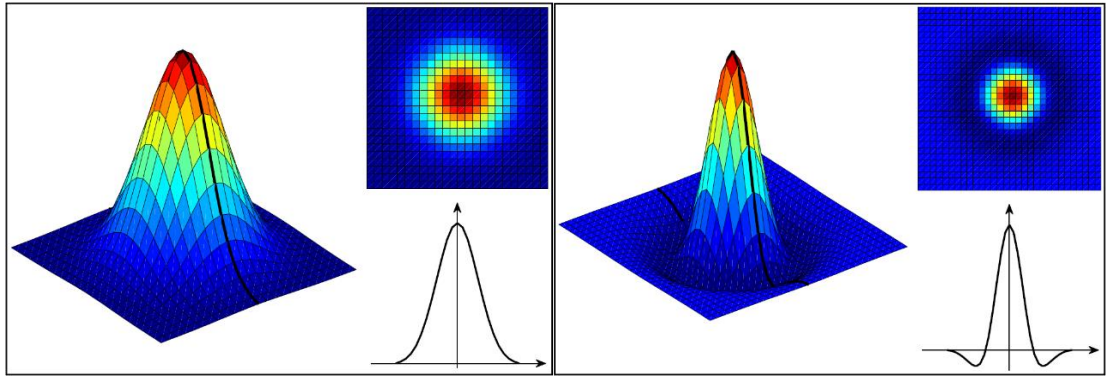
*David Courtenay Marr*¹⁹ (1945-1980) и *Ellen Hildreth*²⁰ предложили су *Laplacian* оператор (енг. *Laplacian of Gaussian - LoG*) за детекцију ивичних пиксела. Овај оператор користи *Gaussian* функцију (Слика 4.34, лево) за филтрирање слике. Након примене *Laplacian* оператора израчунавају се и проналазе нуле другог извода [118], [130], [131].

Генерални кораци оператора су [132]:

1. Побољшање квалитета слике помоћу *Gaussian* филтера, (функција је приказана на Слика 4.34, лево),
2. У другом кораку примењује се *Laplacian* оператор (Слика 4.34, десно),

¹⁹ [https://en.wikipedia.org/wiki/David_Marr_\(neuroscientist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/David_Marr_(neuroscientist)), [датум приступа: 25.07.2020.]

²⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Ellen_Hildreth, [датум приступа: 29.05.2020.]



Слика 4.34 а) Gaussian функција ($\sigma = 4$, $n = 25$),

б) Laplacian функција ($\sigma = 4$, $n = 31$) [133]

2Д LoG функција, центрирана у координатном почетку са стандардним Гаусовим одступањем σ има следећи облик [134], [135]:

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.10)$$

3. У завршном кораку врши се претрага предзнака сваког пиксела. Пиксел код кога је дошло до промене предзнака при чему је нагиб (на основу те промене) већи од дефинисаног прага, усваја се за ивични.

4.9.2 Градијентни оператори

У класичне методе детекције ивица, које спадају у групу градијентних метода убрајају се: *Robert*, *Prewitt* и *Sobel* оператор [133], [136]. Ови оператори не дају оштре ивице и осетљиви су на повећано присуство шума. Алгоритми из градијентне групе оператора имају заједничку структуру, а разликују се по начину филтрирања. Уобичајен алат за проналажење величине и смера интензитета пиксела са слике f је оператор градијента (означен као ∇), који се дефинише према следећем изразу [133]:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Величина (M) и правац (θ) градијентног вектора ∇f за локацију (x, y) рачуна се према [133]:

$$\begin{cases} M(x, y) = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \\ \theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{f_x}{f_y} \right) \end{cases} \quad (4.12)$$

За прорачун градијента, одређује се први извод за сваки пиксел на слици. У наставку су објашњене методе које су базиране на овом принципу.

4.9.2.1 Robert

Ово је једна од најстаријих метода детекције ивичних пиксела на слици и често се користи у случајевима када су једноставност и брзина примарни услови детекције [137]. Вредност сваког пиксела представља процену просторног градијента улазне слике у тој тачки [138]. Прорачун градијента може да се врши као разлика било која два пара међусобно управних смерова. За обраду слике користи се разлика између суседних дијагоналних пиксела [139]. Прорачун градијента врши се применом следећег израза:

$$G[f_{[i,j]}] = |f_{[i,j]} - f_{[i+1,j+1]}| + |f_{[i+1,j]} - f_{[i,j+1]}| \quad (4.13)$$

Овај израз може једноставније да се прикаже преко маске на следећи начин:

$$G[f_{[i,j]}] = |G_x| + |G_y| \quad (4.14)$$

Где претходне маске имају следећи облик:

$$G_x = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 0 \\ \hline 0 & -1 \\ \hline \end{array} \quad G_y = \begin{array}{|c|c|} \hline 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 \\ \hline \end{array}$$

4.9.2.2 Prewitt

Овај оператор се темељи на целобројном филтеру у хоризонталном (x) и вертикалном (y) смеру. Спада у групу брзих метода детекције ивица [140], који су осетљиви на присуство шума и смањен контраст на слици [108]. Ивични пиксели се добијају као разлика између интензитета одговарајућих маски 3×3 на основу осам различитих смерова. Као крајњи резултат усваја се маска са највећим срачунатим модулом [141], [142].

$$G_x = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline \end{array} \quad G_y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array}$$

Прорачун и угао градијента у свакој тачки врши се на основу следећих израза:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4.15)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_x}{G_y}\right) \quad (4.16)$$

4.9.2.3 Sobel

Sobel-ов оператор [143] користи две маске димензија 3×3 , од којих прва процењује градијент у смеру (x) осе, док друга процењује градијент у смеру (y) осе [144], [145].

Прорачун градијента у свакој тачки врши се према изразу (4.15), док се апроксимација одређује према следећем изразу:

$$|G| = |G_x + G_y| \quad (4.17)$$

Маске имају следећи облик:

$$G_x = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -2 & 0 & 2 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} \quad G_y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline \end{array}$$

Угао градијента ивичног пиксела рачуна се према изразу (4.16). Иако овај оператор има спорији одзив у односу на остале операторе из групе којој припада, маска димензија 3×3 у већој мери филтрира улазну слику и на тај начин је оператор мање осетљив на присуство шума. Што су димензије маске веће, то је њена осетљивост на присуство шума већа.

4.9.2.4 Canny

Алгоритам који је предложио *John F. Canny* (1986) карактеришу следеће особине: добра детекција и локализација ивичних пиксела, као и јединствен одзив. Основни циљ овог алгоритма био је развој оптималне детекције ивичних пиксела са „оштрим“ ивицама и минималним степеном лажне детекције [76]. Општи критеријуми *Canny* детектора ивичних пиксела на слици су [116]:

- Детекција ивичних пиксела са минималним процентом грешке,
- Тачна локализација ивичног пиксела,
- Ивични пиксел треба да буде означен само једном и
- Утицај шума на детекцију лажних ивичних пиксела треба свести на минимум.

Од развијених метода за детекцију ивица, *Canny* алгоритам је један од најстроже дефинисаних метода који обезбеђује добру и поуздану детекцију ивичних пиксела. Захваљујући својим могућностима да испуни наведене критеријуме за детекцију ивица и једноставног процеса имплементације, постао је један од најпопуларнијих алгоритама за детекцију ивица, који проналази широку примену у обради слике.

Canny алгоритам детекције ивичних пиксела састоји се из неколико корака:

1. Примењује се *Gaussian* филтер димензија $(2k + 1) \times (2k + 1)$:

$$G(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(i-k-1)^2 + (j-k-1)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.18)$$

Где је:

$$1 \leq i, j \leq 2k + 1$$

Овај корак умањује утицај шума на откривање ивичних пиксела што за последицу има смањен проценат лажне детекције. Повећањем димензија филтера смањује се осетљивост на шум, али се повећава грешка локализације ивичног пиксела. Димензије филтера од 5×5 (*i.e.*, $k = 2$), дају добар резултат у већини примера.

2. Проналази се градијент интензитета слике из првог корака

У циљу одређивања градијента примењује се оператор за детекцију ивичних пиксела (нпр. *Robert Cross* [146]) који враћа вредност првог извода у хоризонталном и вертикалном правцу. Градијент интензитета слике одређује се према изразу:

$$I = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad (4.19)$$

Ивични пиксел може бити усмерен у више смерова, а *Canny* алгоритам разликује хоризонталне, вертикалне и дијагоналне правце на слици (који се користе у наредном кораку алгоритма). За одређивање угла градијента примењује се следећи израз:

$$\theta = \tan^{-1}(I_y/I_x) \quad (4.20)$$

Добијене вредности углова се заокружују на један од четири могућа правца: 0, 45, 90 или 135 степени.

3. Проређивање рубова

Овај корак има за циљ да потисне све вредности градијента (постављајући их на 0), осим локалних максимума који означавају места са највећим променама интензитета суседних пиксела. Како би се то постигло алгоритам за сваки ненулти пиксел проверава да ли је његов интензитет градијента већи од суседна два (у правцу градијента). Ако је претходни услов задовољен, пиксел се задржава непромењен, у супротном се поставља на нулу.

- Ако је угао градијента 0° (нпр. правац север-југ), сматра се да он представља ивични пиксел, ако је интензитет његовог градијента већи од интензитета градијента пиксела у правцима исток и запад.
- Ако је угао градијента 45° (нпр. правац северозапад-југоисток), сматра се да он представља ивични пиксел ако је интензитет његовог градијента већи од интензитета градијента пиксела у правцима североисток и југозапад.
- Ако је угао градијента 90° (нпр. правац исток-запад), сматра се да он представља ивични пиксел ако је интензитет његовог градијента већи од интензитета градијента пиксела у правцима север и југ.

- Ако је угао градијента 135° (нпр. правац североисток-југозапад), сматра се да он представља ивични пиксел ако је интензитет његовог градијента већи од интензитета градијента пиксела у правцима северозапад и југоисток.

У овом објашњењу подразумева се да су смерови обострани (нпр. север-југ је исти правац као и југ-север).

4. Примена двоструког прага

Четврти корак има задатак да изврши додатну проверу тренутног скупа ивичних пиксела. То се постиже одабиром и применом две граничне вредности (горња и доња граница интензитета градијента). Ако је вредност интензитета градијента ивичног пиксела већа од горње границе, тај пиксел се означава као „јак“ ивични пиксел. Ако је вредност интензитета градијента између горње и доње границе, пиксел се означава као „слаб“ ивични пиксел. Уколико је вредност интензитета градијента мања од доње граничне вредности, пиксел се потискује из скупа ивичних пиксела, тј. његова вредност интензитета градијента се поставља на нулу.

5. Провера „слабих“ пиксела

Завршни, пети корак *Canny* алгоритма уклања празнине између ивичних сегмената и доводи све ивичне пикселе на исту вредност интензитета. Сви пиксели који су означени као „јаки“ у четвртом кораку, сигурно ће остати у крајњем скупу ивичних пиксела. Поред тога, „слаб“ ивични пиксел задржава се само ако у непосредној околини има „јак“ ивични пиксел. Конкретно, за сваки „слаб“ ивични пиксел формира се субматрица димензија 3×3 са анализираним пикселом у средини. Након тога проверава се да ли у неком од осам околних пиксела постоји бар један „јак“ ивични пиксел. Уколико је дефинисани услов испуњен тај пиксел се задржава у крајњем скупу ивичних пиксела и његова вредност поприма вредност „јаког“ ивичног пиксела, а у супротном се брише.

4.9.3 Резиме

Оператори попут *Sobel* и *Robert* који користе први извод за откривање ивичних пиксела имају једноставну реализацију, али су више подложни лажној детекцији и осетљивији су на присуство шума [147], [148]. Такође, код примене *Sobel* оператора детектоване ивице могу бити шире од очекиваног резултата [149], [150]. Основни недостатак *LoG* оператора јесте смањена тачност у одређивању градијента ивичних пиксела, нарочито код закривљених ивица

где постоје разлике у интензитету пиксела [147]. *Canny* алгоритам је примарно намењен за *grayscale* слике, међутим, уз једноставна проширења омогућује примену у детекцији ивичних пиксела и за слике у боји [151], [152], или препознавању покретних предмета у сцени [153].

На основу анализираних радова из ове области, уочено је да се алгоритам кога је предложио *John F. Canny* (1986) сматра идеалним алгоритмом за детекцију ивичних пиксела на дигиталној слици [147], [148], [154]. Ово запажање потврђују и резултати приказани на Графиконима 4.1 – 4.3, где су над пет сложених узорака примењени сви претходно објашњени оператори. У оквиру ове анализе обухваћена су три параметра: просечан утицај шума (Графикон 4.1), просечно време процесирања (Графикон 4.2) и тачност детекције ивичних пиксела (Графикон 4.3).

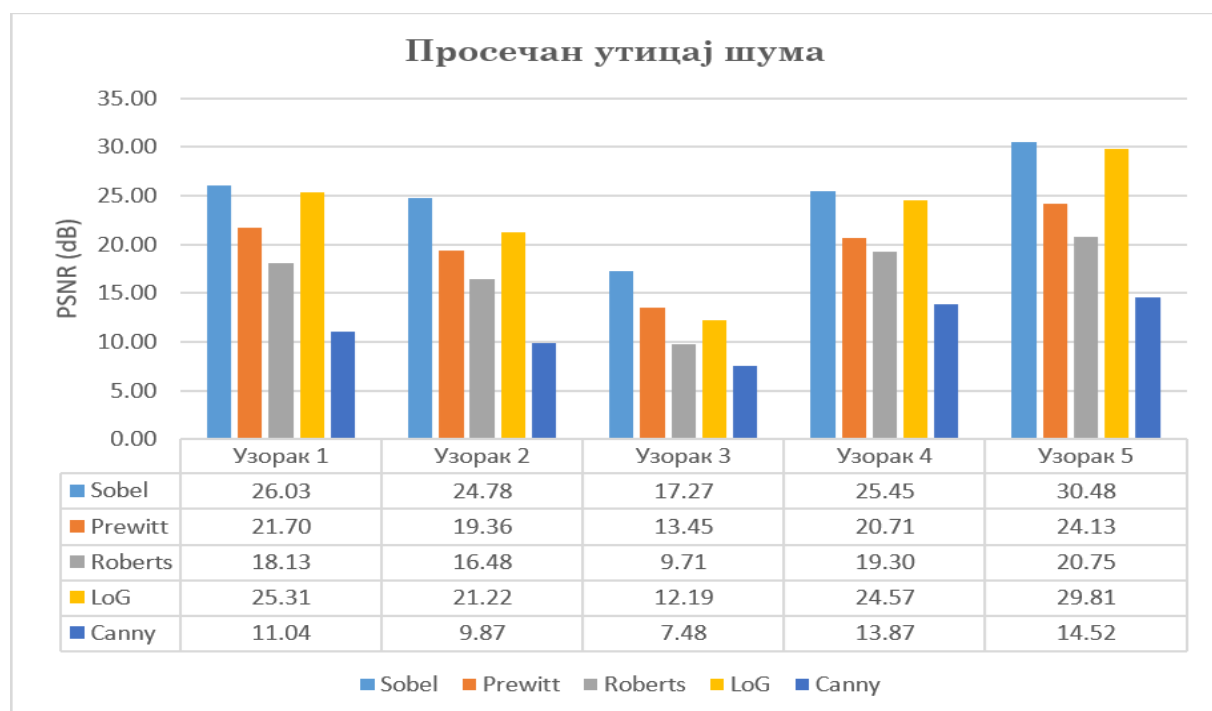


График 4.1 Просечни утицај шума за различите детекторе ивица [150]

Са Графикона 4.1 уочава се да *Canny* алгоритам карактерише смањен утицај шума у односу на остале операторе [142]. Овај резултат потврђен је код свих пет анализираних узорака. Највећи утицај шума уочен је код *Sobel* и *LoG* оператора, док је средњи утицај шума регистрован применом *Prewitt* и *Roberts* оператора.

Када је време процесирања у питању, са Графика 4.2 уочава се да је најдуже време процесирања регистровано код *Sobel* оператора, а најмање применом *Roberts* оператор. *Canny* алгоритам није најбржи али је и његовом применом време процесирања мање од 0.5 секунди над свим анализираним узорцима.

На основу тачности детекције ивичних пиксела (Графикон 4.3) јасно се уочава да су најбољи резултати постигнути применом *Canny* алгоритма. Двоструко

већа тачност детекције применом *Canny* алгоритма постигнута је на скоро свим узорцима у односу на *Sobel*, *Prewitt* и *LoG* операторе. Такође, проценат тачности који је постигнут применом *Canny* алгоритма је на четири узорка већи од 85%, за разлику од осталих оператора код којих је на доста узорка овај проценат испод 50%.

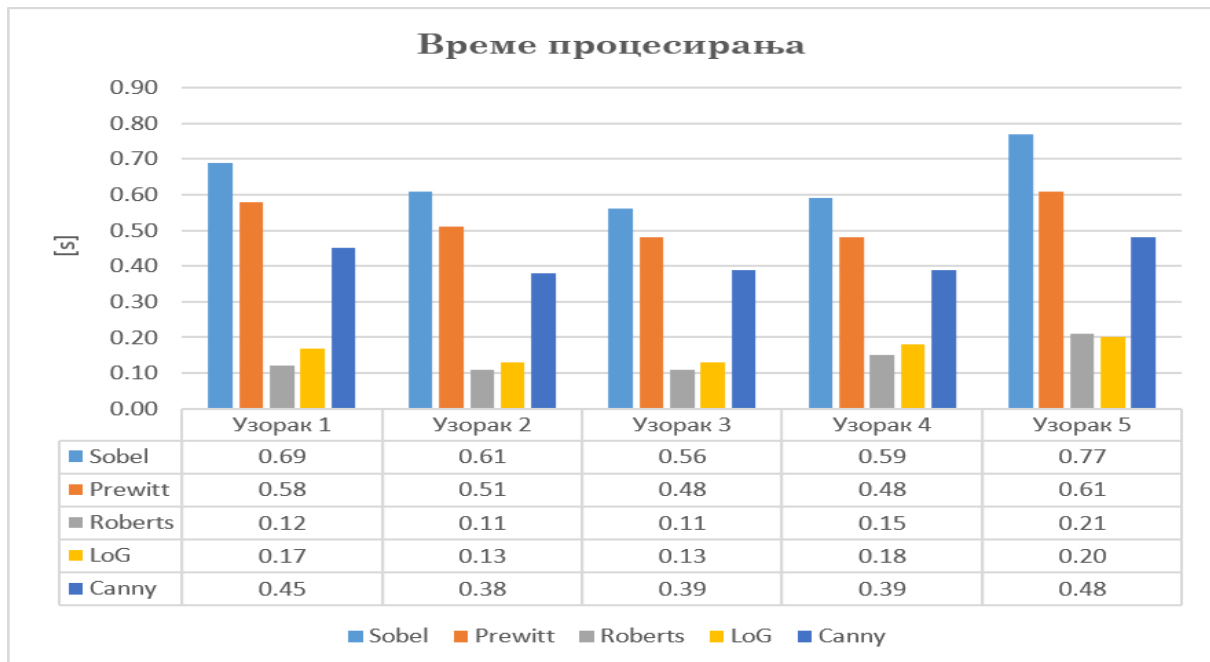


График 4.2 Просечно време процесирања за различите детекторе ивица [150]

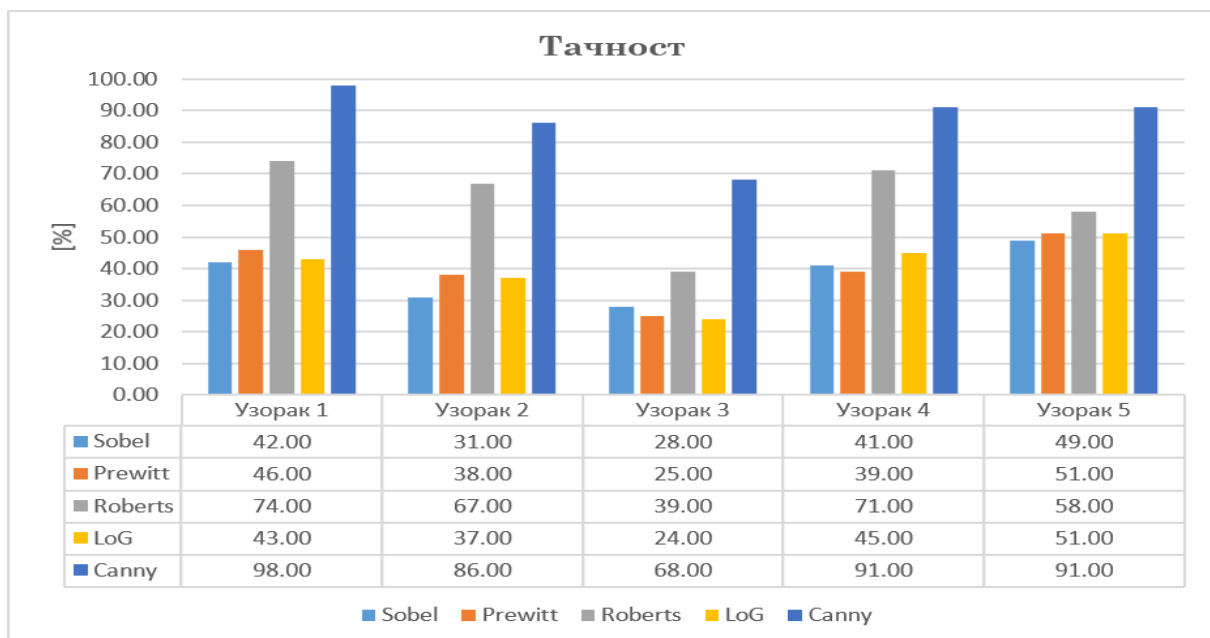


График 4.3 Тачност детекције ивичних пиксела за различите детекторе [150]

На основу високог процента тачности и најмање осетљивости на утицај шума потврђује се да је *Canny* алгоритам детекције ивичних пиксела један од најбољих алгоритама за детекцију ивичних пиксела.

4.10 Резиме поглавља

У *уводном делу* овог поглавља објашњена су два основна приступа обраде радарграма и приказана је анализа тренутног стања у научној области. Поред тога, сагледани су досадашњи приступи у процесу аутоматизоване обраде радарграма и извучени закључци о правцима који би требало додатно да се истраже.

Кроз *први део* овог поглавља наводе се правци развоја алгоритма за аутоматизован процес детекције хиперболичних рефлексја на радарграмима и екстракције тачака на њиховим крацима.

У *другом делу* анализирају се алгоритми који су наведени у оквиру правца истраживања, објашњавајући њихове теоријске основе и принципе рада са акцентом на планирану област примене.

За *COD* алгоритам објашњен је процес обуке класификатора и карактеристике његових постојећих модела. Кроз ово поглавље детаљно су анализирани параметри унутар различитих модела детектора. На основу извршених анализа донети су закључци који детектор је најпогоднији за процес аутоматизоване детекције хиперболичних рефлексја на радарграму.

Након анализе *COD* детектора дат је увод у вештачке неуронске мреже и основни принцип њиховог рада. У наставку је стављен акценат на конволуционе неуронске мреже, где су објашњени основни слојеви, архитектура и процес обуке ових мрежа, а затим анализирани постојећи модели за детекцију објеката базирани на *CNN*. Посебна пажња у овом делу усмерена је на време тренирања и тестирања различитих модела, те одабира оптималног модела за детекцију хиперболичних рефлексја на радарграму у реалном и блиско реалном времену.

У *завршном делу* овог поглавља анализирани су алгоритми за детекцију ивица. Прво су анализирани основни кораци у поступку рада ових алгоритама као и неки од најважнијих критеријума, а затим је извршена генерална подела ових алгоритама и детаљно анализирани сваки од њих. На основу спроведених анализа на крају овог поглавља усвојен је алгоритам за поступак одређивања координата темена хиперболичних рефлексја.

5. Имплементација предложених алгоритама

У првом делу овог поглавља приказана су софтверска окружења која су коришћена у оквиру дисертације. Поглавље се наставља анализом формата улазних података и њихових основних карактеристика како би се омогућило учитавање у изабрани софтвер за процесирање, без губитка оригиналних информација. Уводни део завршава се приказом организационе структуре улазних података.

Други део поглавља представља алгоритме за аутоматизован процес обраде радарграма развијене у оквиру практичног дела дисертације. Предложена су два алгоритма за поступак аутоматизованог препознавања хиперболичних рефлексивних радарграма. Оба алгоритма ослањају се на концепте дигиталне обраде слике. Први алгоритам базира се на зонској сегментацији радарграма користећи *Viola-Jones* обучавање и дубоке конволуционе неуронске мреже (*CNN*), док се код другог врши тачкаста сегментација радарграма користећи *Canny* детектор ивица. Алгоритми се састоје од неколико фаза које су детаљно објашњене и разрађене како би се координате темена хиперболичних рефлексивних одредиле на што бољи начин. Развој другог алгоритма настао је као потреба елиминације проблема јединствене обуке који фигурише у првом алгоритму. Основни критеријум оба алгоритма јесте да се процесирање радарграма врши у блиско реалном времену. Поред процесирања радарграма у блиско реалном времену, допринос првог алгоритма огледа се у новом начину одређивања координата темена хиперболичних рефлексивних, као и формирању великог броја радарграма са пажљиво одабраним параметрима за обуку (преко 5000). Допринос у другом алгоритму првенствено се огледа у новом начину сегментације ивичних пиксела, који значајно убрзава постојеће алгоритме са овим приступом. Поред тога, постоје и кораци у алгоритму који на јединствен начин врше препознавање и других карактеристичних облика на радарграму, попут хоризонталних слојева.

Посебан допринос дисертације представља предложена процедура за издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексивних, која се може применити над оба алгоритма. Поред јединственог начина за издвајање, посебна пажња се огледа у анализи критеријума заустављања координата тачака на крацима. Издвојени сет координата тачака на крацима представља улазни податак за процену преостала два параметра, брзину и радијус детектованог објекта, који су анализирани у неколико научних радова [155].

5.1 Софтверско окружење

Софтверско окружење коришћено за развој, имплементацију, процесирање и обраду радарграма у оквиру ове дисертације је *MatLAB*. Поред наведеног софтвера коришћен је и *gprMax* за генерисање синтетичких радарграма. Неке од основних особина наведених софтверских окружења и имплементираних функција објашњене су у наредним подпоглављима.

5.1.1 *MatLAB*

MatLAB је програмски језик намењен за нумеричке и математичке прорачуне, те за визуализацију и програмирање. Комбинује радно окружење за итеративне анализе и процесе дизајнирања са програмским језиком који променљиве и улазне податке складишти у виду матрица и низова. Алати за обраду слике располажу са групом добро познатих алгоритама за рад са бинарним сликама, геометријском трансформацијом и морфологијом, што заједно са осталим уграђеним функцијама омогућује анализе како у временском тако и у фреквенцијском домену [156]. Поред ове чињенице, додатни разлози за одабир овог програмског језика огледају се у следећем:

- Могућност читавања реалних и синтетичких радарграма,
- Имплементиране функције из домена *Computer Vision* техника, које поједностављују анализу и процесирање дигиталних слика.

Наведени разлози омогућују надоградњу и проширење алгорита за процес аутоматизоване обраде радарграма уз задржавање оригиналних података аквизиције. За квалитетно препознавање хиперболичних рефлексија на радарграму, могу се засебно анализирати сегменти наведени у Табели 5.1.

Табела 5.1 Основне целине алгорита за препознавања објеката од интереса

<i>Image Processing</i>	<i>Computer Vision</i>	<i>Интерпретација</i>
➤ Елиминација шума	➤ Детекција	➤ Хиперболичне рефлексије
➤ Побољшање контраста	➤ Идентификација	➤ Слојеви
➤ Претварање (конверзије)	➤ Класификација	➤ ...
➤ ...	➤ Препознавање	
	➤ Сегментација	
	➤ ...	

Поред основних *MatLAB* функција, у развоју алгорита коришћене су функције које се налазе у оквиру следећих пакета: *Image Processing Toolbox* и *Computer Vision System Toolbox, Statistics and Machine Learning, Deep Learning Toolbox*.

Image Processing Toolbox

Image Processing Toolbox пружа свеобухватан скуп алгоритама и функција за рад са дигиталним сликама. Ови алгоритми обезбеђују сегментацију, смањење шума, геометријске трансформације, визуелизацију, регистрацију као и 3Д обраду дигиталне слике. Неке од коришћених функција за имплементацију предложених решења у оквиру ове дисертације наведене су у Табели 5.2.

Табела 5.2 Уграђене функције у оквиру *Image Processing Toolbox-a*

<i>Назив функције</i>	<i>Опис</i>
<i>imread</i>	Учитавање дигиталне слике
<i>imwrite</i>	Чување дигиталне слике у жељеној датотеци са одговарајућом екстензијом
<i>imshow</i>	Приказ дигиталне слике на екрану
<i>imfinfo</i>	Информације о учитаној слици
<i>rgb2gray</i>	Претварање дигиталне слике у боји у црно-бели приказ
<i>gray2ind</i>	Претварање црно-беле или бинарне слике у индексирани
<i>mat2gray</i>	Претварање матрице у црно-белу слику
<i>impxel</i>	Очитавање вредности пиксела са жељене локације
<i>improfile</i>	Приказ низа интензитета пиксела дуж жељеног правца између две произвољне тачке
<i>imroi</i>	Селекција региона од интереса (<i>ROI</i>)
<i>imadjust</i>	Промена вредности интензитета дигиталне слике
<i>imgaussfilt</i>	2Д <i>Gaussian</i> филтер
<i>histeq</i>	Појачање контраста користећи хистограм

Computer Vision System Toolbox

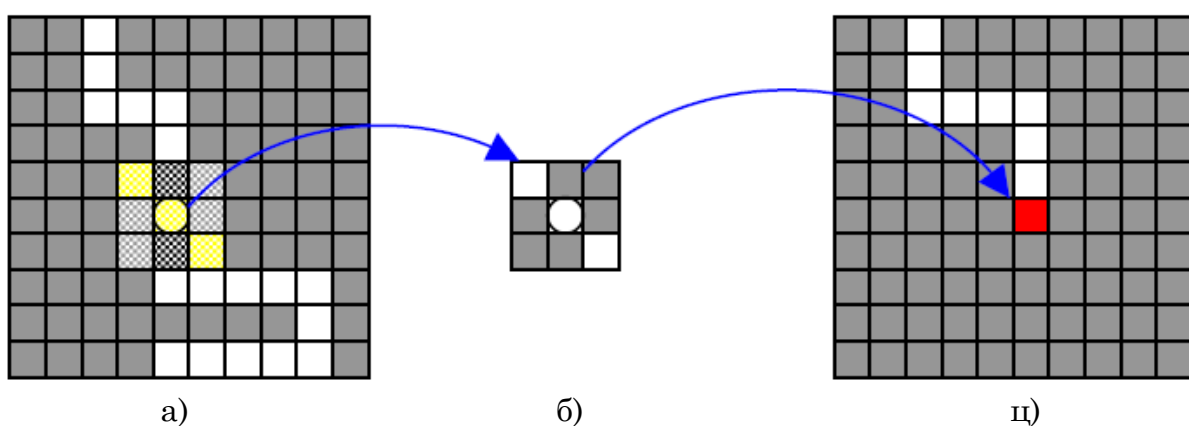
Алгоритми и функције за анализу и детекцију објеката од интереса на дигиталној слици или видео запису у *MatLAB*-у налазе се у оквиру *Computer Vision System Toolbox*. Ови алати обезбеђују детекцију, препознавање и екстракцију објеката од интереса како на дигиталним сликама тако и на видео запису. *Computer Vision System Toolbox* подржава неколико приступа за класификацију и детекцију објеката од интереса на дигиталним сликама, укључујући:

- *Deep learning and Convolutional neural networks (CNNs)*
- *Bag of features*
- *Template matching*
- *Blob analysis*
- *Viola-Jones algorithm*

Акцент у оквиру ове дисертације је на конволуционим неуронским мрежама и *Viola-Jones* алгоритму. *Viola-Jones* алгоритам спада у категорију *Support Vector Machine (SVM)* који за препознавање објеката од интереса на дигиталној слици захтева обуку класификатора. Процес обуке креира се на основу низа позитивних и негативних узорака (Слика 4.5, 4.6). Полазећи од креираних класификатора са надгледаним учењем *SVM* алгоритам гради модел који анализирани узорак сврстава у једну од две групе, образујући на тај начин бинарни линеарни класификатор. Поред линеарних класификатора *SVM* могу извршавати и нелинеарну класификацију ослањајући се на кернеле, који нису у домену ове дисертације.

Са друге стране конволуционе неуронске мреже спадају у класу неуронских мрежа које поседују више скривених слојева. Различит број и комбинација скривених слојева обезбеђују детаљну и свеобухватну анализу препознавања, детекције или сегментације сложених објеката од интереса на дигиталним сликама.

Као додатне информације за препознавање објеката од интереса на дигиталној слици често се користе информације о ивичним пикселима. Постоји више алгоритама који обезбеђују препознавање ивичних пиксела на дигиталним сликама а један од најпознатијих који је коришћен и у оквиру ове дисертације је *Canny* детектор. Такође, често коришћене операције *Computer Vision-a* над бинарним сликама су и морфолошке операције [156]. Улазни и излазни податак за ове операције представља бинарна слика. Вредности бинарних пиксела који ће бити измењени у резултујућој слици директно су зависни од обрасца који се примењује над улазном сликом (Слика 5.1). Ови обрасци базирани су на суседним пикселима чији просторни распоред обезбеђује препознавање неког специфичног облика.



Слика 5.1 Оригинална слика (а), пример маске за примену морфолошке операције (б) и резултујућа слика (ц)

Две основне морфолошке операције су: дилатација и ерозија. Операција дилатације подразумева додавање нових пиксела, за разлику од ерозије која их уклања. Ови процеси испитују се на основу креиране маске која обухвата

суседне пикселе и испитује дефинисан образац распореда ивичних пиксела. У циљу одређивања координата темена хиперболичних рефлексија креиране су специјализоване маске у оквиру предложених алгоритама ове дисертације.

5.1.2 *gprMax*

За генерисање синтетичких радарграма у оквиру ове дисертације коришћен је *gprMax* [35]. *GprMax* је софтвер отвореног кода, написан у *Python* програмском језику са деловима који су написани у *Cython*-у. Улазни податак за симулацију представља *.in* фајл (Слика 5.3), састављен од низа предефинисаних наредби које дефинишу геометрију и параметре скенирања. Процес симулације подразумева нумеричко решавање Максвелових једначина уз дискретизацију времена и простора ослањајући се на *Finite-Difference Time-Domain (FDTD)* (Слика 5.2).

	$ \begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - J_{Sx} - \sigma E_x \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_{Sy} - \sigma E_y \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_{Sz} - \sigma E_z \right) \\ \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - M_{Sx} - \sigma^* H_x \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - M_{Sy} - \sigma^* H_y \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - M_{Sz} - \sigma^* H_z \right) \end{aligned} \tag{5.1} $
--	---

Слика 5.2 Дискретизација времена и простора за симулацију код *gprMax-a*

У оквиру *.in* фајла неопходно је дефинисати следеће вредности:

- **Домен.** Простор решавања Максвелових једначина, који се обично подудара са величином сцене. Под сценом се подразумева део домена сачињен од првог до последњег слоја одговарајућег медија са жељеним објектима, њиховим материјалом, димензијама и диспозицијом.
- **Дискретизација простора и времена.** За корак дискретизације (5.5) узима се десетина максималне фреквенције побудног сигнала (5.3), док се за прорачун максималне фреквенције побудног сигнала узима 2-3 пута већа вредност у односу на централну фреквенцију антене (f_a). Домет изражен у *ns*, рачуна се на основу познате вредности диелектричне константе (5.6), тако да сви објекти у оквиру дефинисане сцене буду обухваћени.

$$\vartheta = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (5.2)$$

$$f_{max} \approx const \cdot f_a \quad (5.3)$$

$$\lambda = \frac{\vartheta}{f_{max}} \quad (5.4)$$

$$d = \frac{\lambda}{10} \quad (5.5)$$

$$t = \frac{2s}{\vartheta} \quad (5.6)$$

Где је:

$$const = [2 - 3]$$

f_{max} - максимална фреквенција побудног сигнала

f_a - централна фреквенција антене

d - корак дискретизације простора

t - временски прозор

- **Материјал.** У оквиру секције материјала морају се наћи сви материјали који фигуришу у дефинисаној сцени (материјали који дефинишу медијум и објекте). Такође, постоје и неки уграђени материјали који се могу позивати према њиховом предефинисаном називу, попут: *pec* – *perfect electric conductor* (за металне објекте).
- **Побуда и пријемник.** Овај део подразумева дефинисање типа побудног сигнала (*ricker*, *gaussian*), укључујући и вредност централне фреквенције антене и поларизациону раван извора. У свим симулацијама поларизациона раван извора је у правцу z осе (Ez). Поред тога, засебно се дефинишу координате пријемног и предајног дела антене, као и њихов померај по координатним осама. За овај сегмент битно је дефинисати теоријско растојање између пријемног и предајног дела антене, што је према [33] наведено у табели:

Табела 5.3 Теоријска растојања између пријемног и предајног дела GPR антена

Централна фреквенција антене	200	400	900
Размак [cm]: Tx - Rx	33.2	16	11

Код дефинисања почетних координата предајног дела антене треба водити рачуна да он не креће из дела *PML-a* (*Perfectly Matched Layer*), који представља оквир у коме могу настати сметње у симулацији у смислу генерисања рефлексација од граничних вредности сцене за

симулацију. Вредност $PML-a$ је обично 20 мерних јединица дискретизације са обе стране посматраног домена. То значи да предајни део антене не сме да крене из $PML-a$, исто тако, пријемни део антене треба да се заустави пре $PML-a$.

- **Геометрија.** У овом делу захтева се дефинисање димензија и диспозиције које се односе како на објекте тако и на слојеве медијума у сцени. Случај јединственог слоја медијума (најједноставнија сцена) се описује јединственом вредношћу диелектричне константе. Генерално, свака зона која има различиту вредност диелектричне константе у односу на околину подразумева дефинисање геометрије те зоне. Геометрија хоризонталних слојева медијума се дефинише преко паралелоипеда, док се објекти кружног попречног пресека дефинишу као цилиндри одговарајућег радијуса. Њихова дебљина најчешће је једнака вредности дискретизације.

На Слици 5.3 приказан је садржај једног једноставног *.in* фајла.

```
#title: Jedna metalna cev u homogenom zemljistu
#domain: 3 2 0.01
#dx_dy_dz: 0.01 0.01 0.01
#time_window: 20e-9

#material: 6 0 1 0 materijall

#waveform: ricker 1 0.9e9 antenal
#hertzian_dipole: z 0.2 1.8 0 antenal
#rx: 0.3 1.8 0
#src_steps: 0.01 0 0
#rx_steps: 0.01 0 0

#box: 0 0 0 3 1.8 0.01 materijall
#cylinder: 1.5 0.8 0 1.5 0.8 0.01 0.02 pec
```

Слика 5.3 Пример једноставног *.in* фајла

За покретање симулације неопходно је срачунати максималан број *scan*-ова. Код овог прорачуна треба узети у обзир вредност $PML-a$, величину дискретизације, померај предајног и пријемног дела антена и њихових почетних координата. По завршетку симулације биће генерисан задати број *A-scan*-ова. *A-scan*-ови се додатном наредбом могу објединити тако да образују *B-scan*, који је сачуван у фајл са *.out* екстензијом. Ови фајлови се даље користе као синтетички радарграми за тестирања и анализе у оквиру дисертације, тако да је неопходно обезбедити функцију у *MatLAB*-у за њихово учитавање.

5.1.2.1 Одређивање оптималне вредности дискретизације

Важан параметар за синтетичке радарграме представља вредност дискретизације. Ова вредност дефинише димензије коцке у којој се врши прорачун Максвелових једначина према *Finite-Difference Time-Domain (FDTD)* методи [157], [158]. Важно је напоменути да величина дискретизације може значајно да утиче на време симулације. Такође, смањење величине дискретизације не мора да значи побољшање крајњег резултата, јер зависи од више параметара. Из тог разлога неопходно је одабрати оптималне вредности које ће се користити за генерисање синтетичких радарграма. У наставку рада приказана је анализа вредности параметра дискретизације у зависности од диелектричне константе за три централне фреквенције антена: 200, 400 и 900MHz. Графички прикази 5.1-5.3 обухватају вредности диелектричне константе у опсегу 1-20, где је за сваку вредност срачуната минимална, максимална и просечна вредност дискретизације. На основу добијених резултата долази се до оптималних вредности дискретизације које су наведене у Табели 5.4.

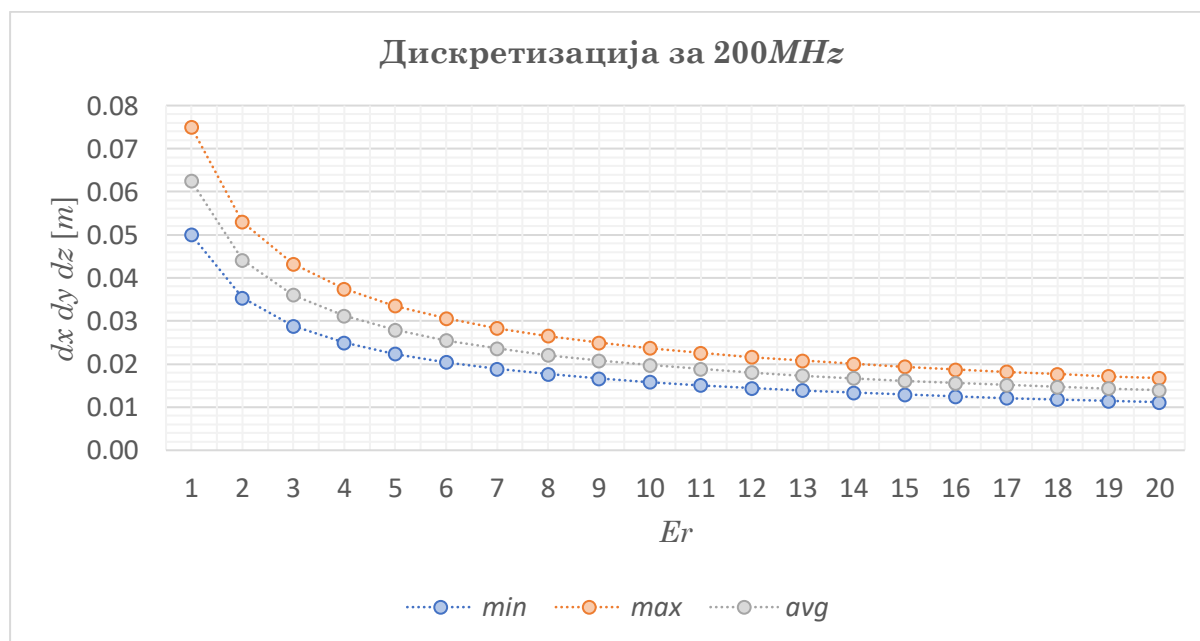


График 5.1 Вредност дискретизације у зависности од диелектричне константе за антену централне фреквенције 200MHz

Ако се посматра оптимална вредност дискретизације за антене од 200 и 400MHz са графичких приказа 5.1 и 5.2 уочава се да те вредности покривају опсег диелектричних константи од 4-14, док су за антену 900MHz ове вредности у опсегу [5-12] (Графикон 5.3).

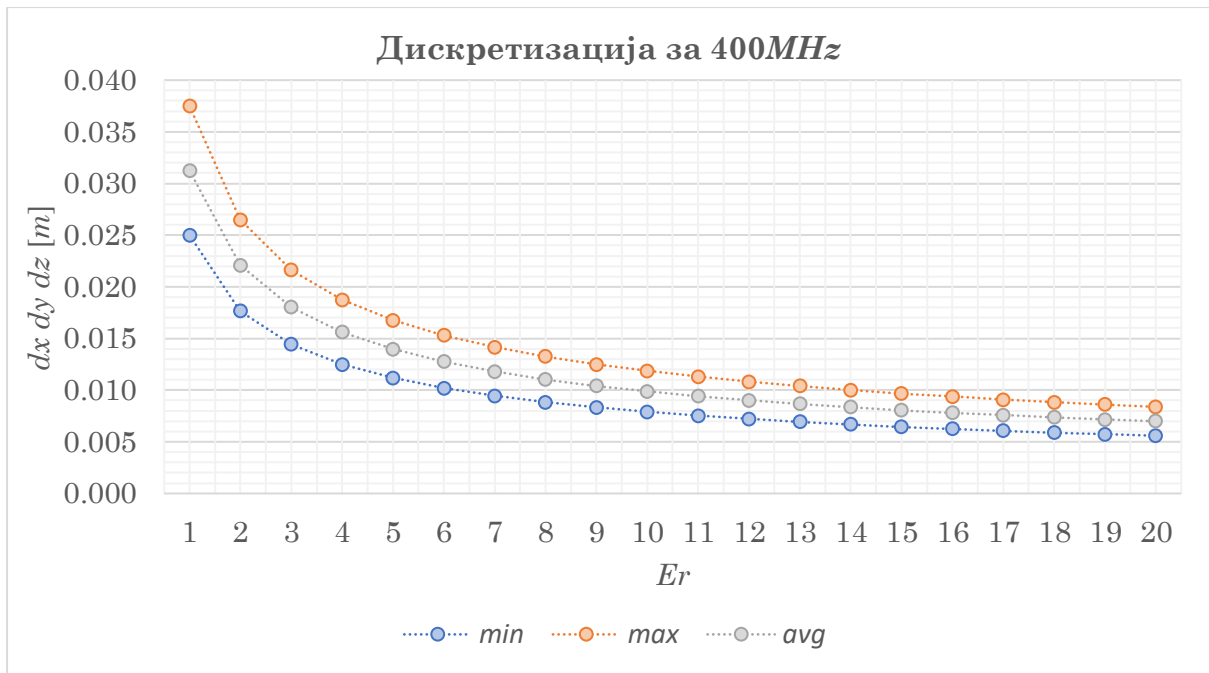


График 5.2 Вредност дискретизације у зависности од диелектричне константе за антену централне фреквенције 400MHz

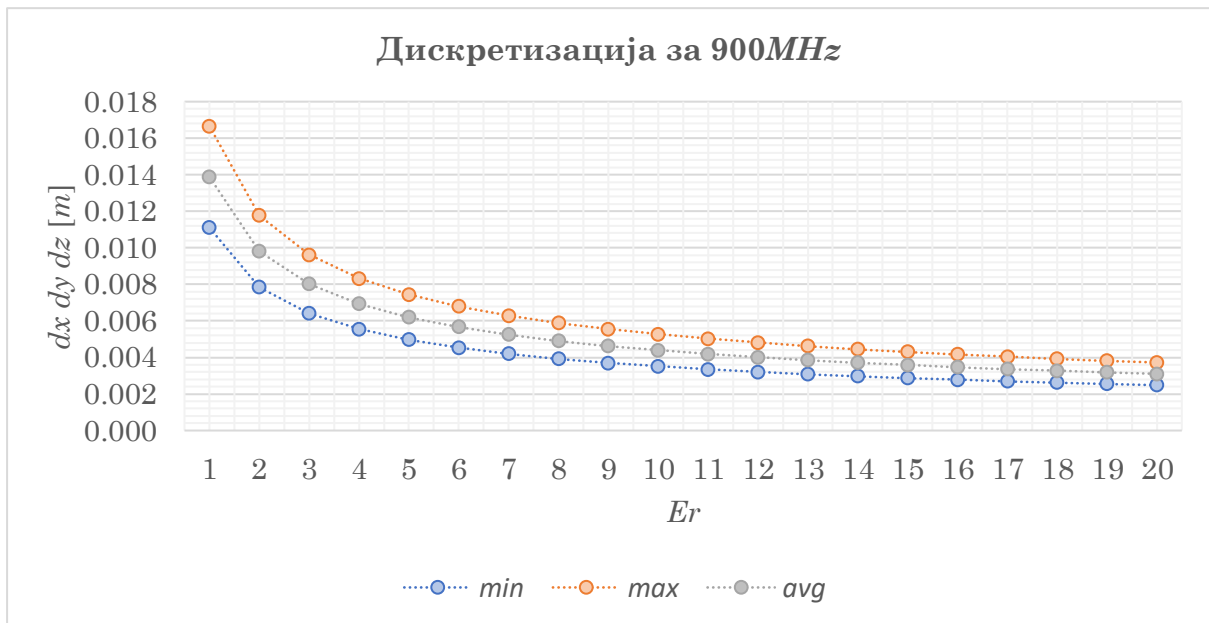


График 5.3 Вредност дискретизације у зависности од диелектричне константе за антену централне фреквенције 900MHz

Табела 5.4 Оптималне вредности дискретизације за синтетичке радарграме у зависности од централне фреквенције антене

Антена [MHz]	Оптимална вредност дискретизације
200	[0.02 - 0.025]
400	[0.01 - 0.0125]
900	0.005

5.2 Улазни подаци

У оквиру овог поглавља анализирани су извори и формати записа улазних података, како би се обезбедило њихово читавање и процесирање у *MatLAB*-у. Улазни подаци алгоритма за аутоматизовану обраду радарграма у оквиру ове дисертације су:

1. Реални подаци који су добијени теренским скенирањем,
2. Синтетички подаци, генерисани према жељеном сценарију и
3. Подаци у облику дигиталних слика (нпр.: *.jpg* екстензија)

У оквиру практичног дела дисертације било је неопходно извршити тестирање како реалних тако и синтетичких радарграма, како би се донели конкретни закључци и развио финални облик алгоритма. Реални подаци су важни јер представљају основне улазне податке прикупљене на терену, док су синтетички радарграми корисни из следећих аспеката:

- а) Могу се генерисати радарграми за произвољан сценарио (жељена фреквенција антене, различита диспозиција и димензије објеката...),
- б) Тестирање граничних могућности одређене фреквенције антене (нпр. хоризонтална, вертикална резолуција),
- ц) Варирање параметара и посматрање њиховог утицаја на крајњи резултат,
- д) Могућност креирања произвољног броја радарграма ослобођених утицаја шума, који је неизбежан у реалним подацима.

5.2.1 Реални радарграми (*.dzt*)

За поступак аутоматизоване обраде радарграма важну улогу има и формат записа у који се складиште подаци скенирања. У оквиру истраживачких активности анализирани су формати записа података водећих произвођача георадара. Поред појединих разлика у хардверским карактеристикама, произвођачи су развијали и прилагођавали различите стандарде записа радарграма. У складу са тим међу најзаступљенијим произвођачима *GPR* опреме данас постоји неколико различитих формата записа радарграма. Најчешћи формати записа радарграма који ће бити објашњени у наставку дисертације, а који се могу срести у пракси су:

- *.dzt* (*GSSI*²¹)
- *.dt1* (*pulseEKKO*²²)
- *.rd3* (*RAMAC*²³)

²¹ <http://www.geophysical.com/>, [датум приступа: 12.07.2020.]

²² <http://www.sensoft.on.ca/>, [датум приступа: 25.07.2020.]

²³ <http://www.malags.se/>, [датум приступа: 24.08.2020.]

GSSI

Реални радарграми који су у фокусу ове дисертације креирани су са *GSSI* опремом. Скраћеница *GSSI* представља акроним од пуног назива америчког произвођача георадар опреме *Geophysical Survey Systems*. Подаци скенирани са овом опремом смештају се у *.dzt* бинарну датотеку, која се састоји од два основна сегмента:

- заглавље датотеке и
- *GPR scan*-ова који се смештају у рубрику о подацима.

Свака *.dzt* датотека може имати максимално до 4 канала података [33], [34].

Основне карактеристике садржаја заглавља су:

- 1024 (новије верзије) или 512 (старије верзије) бита за сваки канал,
- Свако заглавље је „C“ језична структура.

Подаци скенирања:

- *scan*-ови који се састоје од 128, 256, 512, 1024, или 2048 одбирка.
- запис сваког *scan*-а је у 8-битном или 16-битном целобројном запису.
- *scan*-ови су груписани заједно у виду блокова у вишеканалним датотекама (нпр. за 4 канала: *scan 0* - канал 0, *scan 0* - канал 1, *scan 0* - канал 2, *scan 0* - канал 3, *scan 1* - канал 0, *scan 1* - канал 1, *scan 1* - канал 2, *scan 1* - канал 3, *scan 2* - канал 0, итд.).
- нулти канал има резервисана прва два одбирка записа, при чему:
 - Вредност првог одбирка обично има све битове, тј. максималне вредности,
 - Други одбирак је обично постављен на *0xF1* или *0xF100*, *0xF0* или *0xF000*, или *0x80* или *0x8000*, за *scan*-ове који нису маркери,
 - Ако се у току аквизиције примени кориснички маркер тада је други узорак у *scan*-у постављен на *0xE8* или *0xE800*, *0xE1* или *0xE100*, *0xEC* или *0xEC00*, (*0xF1* или *0xF100*, док је за неке верзије софтвера 4.x нормални трагови су *0x80* или *0x8000*).
- први и други одбирак за први, други и последњи канал нису резервисани.

Недостатак конзистенције у запису *scan*-ова представљају трагови корисничких маркера који се у радарграм записују у виду вертикалних испрекиданих линија. Ова места уносе „прекид“ у запису оригиналних података рефлексије сигнала са локације скенирања, што може да отежа аутоматско разликовање оригиналне рефлексије од трагова маркера [34], због чега је пожељно извршити њихову елиминацију. Подаци се морају прво прегледати у циљу утврђивања *GSSI* шеме за прва два одбирка сваког *scan*-а који су смештени у први канал.

pulseEKKO

Опрема *pulseEKKO* потиче од произвођача георадара *Sensors & Software*, са седиштем у Канади. Код овог типа георадара подаци се смештају у бинарну датотеку са *.dt1* екстензијом, док се информације о *scan*-овима чувају у *ASCII* датотеци са *.HD* екстензијом [34]. У оквиру заглавља *.HD* фајла, записују се метаподаци узоркованог радарграма (Прилог 1).

RAMAC

RAMAC стандард записа радарграма настао је од стране шведског произвођача *GPR* опреме: *Malå GeoScience*. У овом случају *scan*-ови се смештају у *.rd3* датотеку док се информације о *scan*-овима чувају у *ASCII* фајл са *.rad* екстензијом. Заглавље *.rad* фајла садржи метаподатке скенирања који су приказани у Прилогу 2.

Део података *GPR* скенирања који се чува према: *RAMAC*, *pulseEKKO* стандардима може једноставно да се уређује и мења у текстуалним едиторима, за разлику од *GSSI* код кога се ниједан део података не чува у виду *ASCII* фајла.

Читање реалних радарграма (*.dzt*)

На основу претходне анализе улазних података, закључује се да је структура *.dzt* фајла који се користи у оквиру ове дисертације сложена. Према начину записа и организацији података у *.dzt* формату креирана је функција у оквиру *MatLAB*-а која омогућује читавање радарграма у виду 2Д матрице. Поред читавања сирових података радарграма, обезбеђена је и функција за читавање додатних параметара скенирања. Ови параметри скенирања значајни су са аспекта њиховог коришћења код аутоматизованог одабира оптималних параметара у појединим фазама алгоритма. Неки од најважнијих параметара скенирања који могу да имају утицај на поједине граничне вредности у алгоритму за аутоматизовано препознавање хиперболичних рефлексција су:

- број одбирака по *scan*-у,
- број *scan*-ова по метру,
- диелектрична константа и слично.

Поред оптимизације појединих корака у алгоритму ови параметри могу да се искористе и код одређивања координата темена хиперболичних рефлексција или радијуса детектованог објекта. Део функције који омогућује читавање података из *.dzt* заглавља (приказ за први канал) приказан је у Прилогу 3.

5.2.2 Синтетички радарграми (.out)

Као резултат генерисања синтетичког радарграма добијају се *.out* фајлови који представљају *A-scan*-ове. Број изгенерисаних *.out* фајлова није увек исти. Он је једнак броју задатих скенова у процесу покретања симулације. С обзиром да радарграм представља улазни податак у алгоритам за аутоматизовано препознавање хиперболичних рефлексива изгенерисани *.out* фајлови се спајају у једну *.out* датотеку, формирајући на тај начин радарграм (*B-scan*).

Читање синтетичких радарграма

Излазна *.out* датотека користи широко подржан формат *HDF5* са *.out* екстензијом који је осмишљен у циљу чувања велике количине нумеричких података. *MatLAB* подржава читање, приказ и едитовање података складиштених у *HDF5* формату (нпр. *h5read*, *h5info*, *h5disp*). Учитавање *.out* фајла у *MatLAB* извршено је на основу уграђене функције:

$$h5read(f2, fieldpath)' \quad (5.7)$$

Где је:

f2 - апсолутна путања до фајла

fieldpath - релативна путања до података са одговарајућом поларизационом равни ('*rxs/rx1/Ez*').

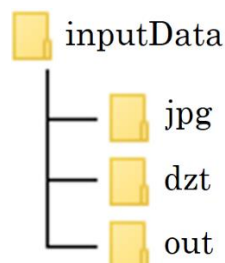
Општа структура *.out* фајла приказана је у Прилогу 4. Приказана структура садржи *HDF5* групе података које се односе на пријемнике (*rxs*), изворе (*srcs*) и предајнике (*tls*), где свака од њих може да садржи по неколико серија ових података.

5.2.3 Радарграми у растерском формату (.jpg)

Због свеобухватности различитих формата улазних података развијени алгоритам за аутоматизовано препознавање хиперболичних рефлексива на радарграмима омогућује и читавање радарграма у виду дигиталних слика са *.jpg* екстензијом. Ови радарграми су значајни са становишта тестирања апликације, али не и одређивања тачне локације или геометрије објекта. Разлог за њихову мању поузданост огледа се у начину њиховог настанка (нпр. сликање радне површине), што може да утиче на промену оригиналних параметара радарграма, јер се на овај начин мења резолуција слике (број *scan/m* или број одбирака/*scan*-у). Ова чињеница може проузроковати доношење погрешних закључака о габаритима, дубини и тачној локацији објекта од интереса, стога неће бити од претеране важности у поступку верификације алгоритма.

5.2.4 Организациона структура улазних података

У првој фази алгоритма потребно је обезбедити учитавање реалних радарграма (датотеке у *.dzt* формату), *.out* фајлова ако се ради о синтетичким подацима или радарграма у растерском облику (нпр. *.jpg*). На Слици 5.4 приказана је хијерархијска структура и организација улазних података.



Слика 5.4 Организациона структура улазних података

У сваком подфолдеру може бити смештен произвољан број датотека за обраду. На овај начин обезбеђује се обрада произвољног броја радарграма, при чему алгоритам аутоматски врши проверу броја датотека у сваком фолдеру и редом их прослеђује у наредне фазе алгоритма.

5.2.5 Резиме

У *првом делу* овог поглавља објашњена су софтверска окружења која су коришћена у практичном делу дисертације. Поред основних особина софтверских окружења наведене су и групе алата и функција које су коришћене у појединим фазама алгоритма. За генерисање синтетичких радарграма објашњена је структура улазног фајла. Посебна пажња у овом делу посвећена је одређивању оптималне вредности дискретизације, као једном од најважнијих параметара за генерисање синтетичког радарграма.

У *другом делу* овог поглавља извршена је анализа структуре улазних фајлова за аутоматизован поступак обраде радарграма. За реалне радарграме извршена је анализа формата записа радарграма развијена од стране водећих произвођача георадар опреме и креирана функција за учитавање података из *.dzt* формата, док је за синтетичке радарграме коришћена уграђена функција за учитавање *.out* фајлова. Овај део поглавља је проширен са учитавањем улазних података у сликовном формату (нпр.: *.jpg*). Структура улазних података коју користе предложени алгоритми у наставку дисертације приказана је у завршном делу дисертације (Прилози).

У *завршном делу* овог поглавља приказана је хијерархијска и организациона структура улазних података наводећи основне карактеристике алгоритма за њихово учитавање.

5.3 Детекција хиперболичних рефлексиија на радарграму и одређивање координата темена

Основни задатак код аутоматизоване обраде радарграма подразумева проналазак координата темена хиперболичних рефлексиија које репрезентују позицију и дубину објеката кружног попречног пресека. Тренутно су развијени различити алгоритми који се баве овом проблематиком (Поглавље 4.2). Њиховом анализом долази се до закључка да не постоји идеалан алгоритам за одређивање координата темена хиперболичних рефлексиија. Главни недостаци огледају се у процесирању које често није у блиско реалном времену, што је најчешће последица сложених прорачуна који су имплементирани у алгоритме или поступак валидације који се често врши само над синтетичким подацима.

У циљу унапређења постојећих алгоритама у оквиру ове дисертације предложена су два алгоритма за аутоматизован процес детекције и одређивања координата темена хиперболичних рефлексиија на радарграму. Почетне фазе предложених алгоритама ослањају се на устаљене процедуре обраде дигиталне слике док су у наредним фазама развијене посебне процедуре за детекцију карактеристичног облика хиперболичне рефлексиије и одређивања координата темена. Предложени алгоритми детаљно су објашњени у наредним поглављима.

5.3.1 Алгоритам 1 – *gprAPEX*

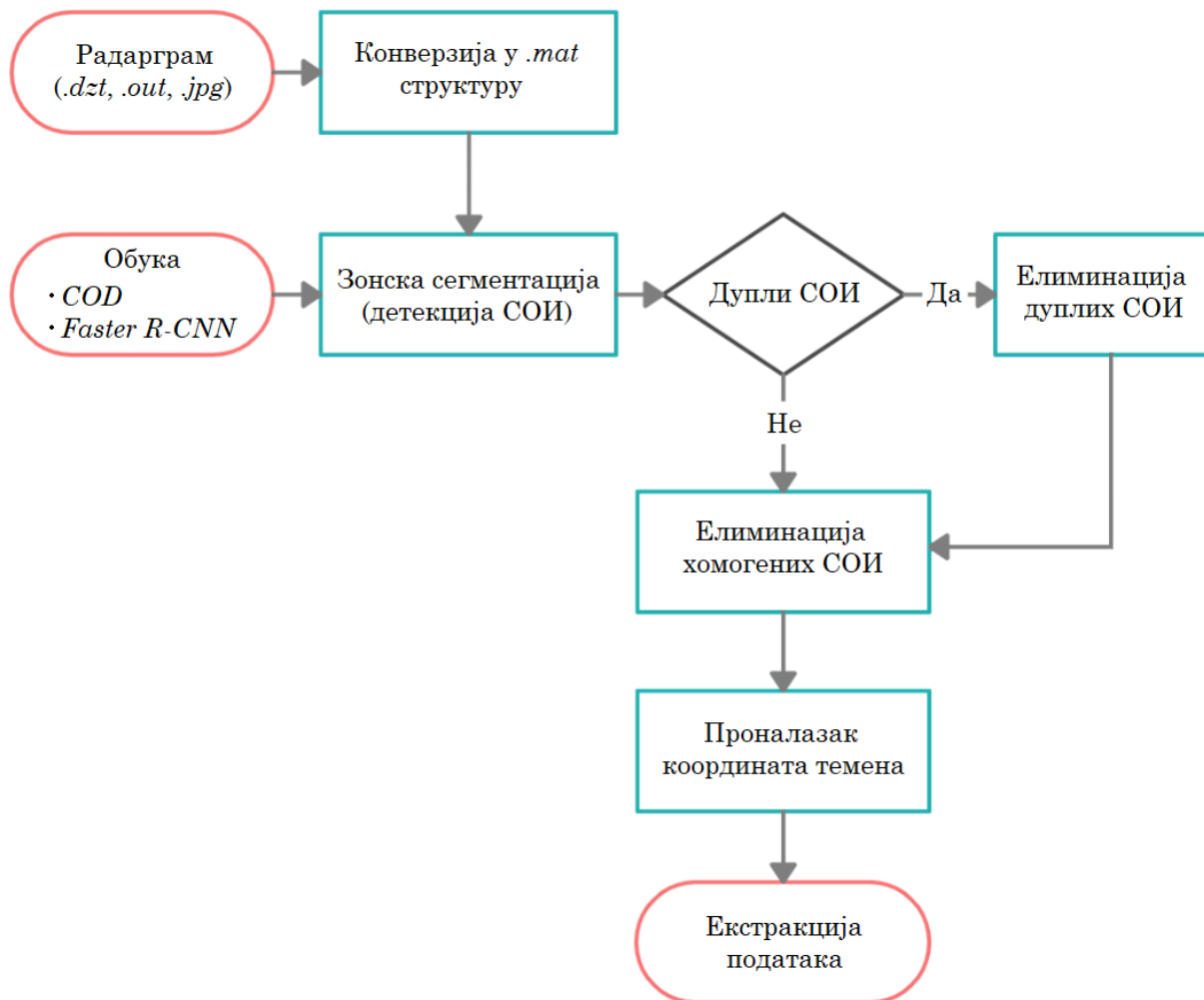
Као што је наведено у Поглављу 4.3 развој алгоритма за поступак аутоматизоване обраде радарграма у оквиру ове дисертације анализира се у временском домену. Стога се радарграм третира као 2Д матрица сачињена од врста и колона, где свака ћелија носи информацију о интензитету рефлектованог сигнала ЕМ таласа са одговарајуће дубине и позиције у радарграму. Први алгоритам за проналазак координата темена хиперболичних рефлексиија носи назив *gprAPEX* који је настао спајањем енглеске скраћенице за георадар (*GPR*) и речи *APEX* која означава теме. Његова имплементација састоји се из две основне целине:

1. Зонска сегментација радарграма и
2. Проналазак координата темена хиперболичних рефлексиија.

Поред основних целина, алгоритам се састоји и од неколико допунских фаза попут:

- конверзије улазних података,
- елиминације дуплих сегмената од интереса (СОИ) и
- елиминације хомогених зона СОИ.

На Слици 5.5 приказан је блок дијаграм првог алгоритма под називом *gprAPEX*, који је имплементиран у оквиру ове дисертације.



Слика 5.5 Блок дијаграм *gprAPEX* алгоритма (Алгоритам 1)

Један од најважнијих параметара аквизиције овог алгоритма је број одбирака/*scan*-у. Оптималне вредности примене алгоритма постижу се за 256, 512 и 1024 одбирка/*scan*-у.

Повећањем броја одбирка/*scan*-у долази до појаве сувишних информација, без побољшања крајњих резултата [14]. Разлог томе огледа се у малој дубини скенирања. На пример, ако се скенирање врши до 2м са 2048 одбирка/*scan*-у то значи да је вертикални размак између две суседне врсте 0.001m. С обзиром да се резолуција антена које се користе у раду креће од 1-10cm повећање броја одбирка/*scan*-у на овако малим дубинама скенирања нема позитиван ефекат. Додатна негативна последица повећавања овог параметра представља и вишеструко заузимање меморије записа радарграма са дуплирањем броја одбирка/*scan*-у.

У наставку дисертације детаљно се анализира свака фаза која је приказана на блок дијаграму (Слика 5.5).

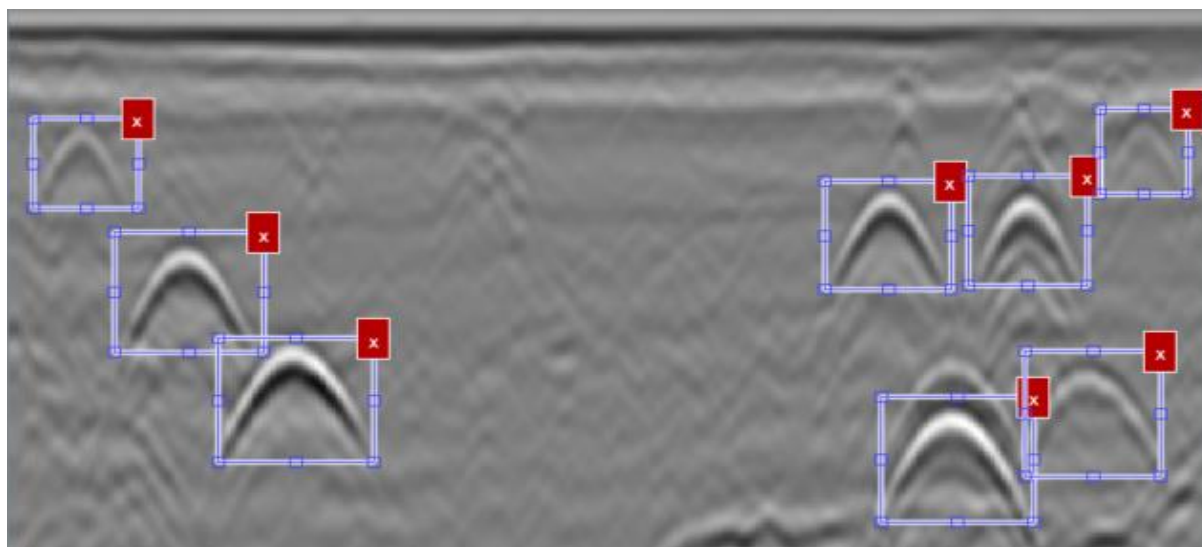
5.3.1.1 ФАЗА 1: Зонска сегментација радарграма

Један од најважнијих корака алгоритама који су базирани на детекцији објеката од интереса је сегментација. Зонска сегментација радарграма у овом случају подразумева издвајање зона у форми полигона правоугаоног облика који потенцијално садрже хиперболичне рефлексије. Ова фаза базирана је на хипотези да мањи проценат радарграма садржи сегменте од интереса (СОИ). СОИ представљају површинске сегменте радарграма који садрже карактеристичан облик хиперболичне рефлексије, формиране скенирањем ОПИ кружног попречног пресека. За проналазак ових зона на радарграму имплементирана су два алгорита:

1. *COD* алгоритам, базиран на машинском учењу и *Viola-Jones* обуци и
2. *Faster R-CNN*, базиран на конволуционим неуронским мрежама.

5.3.1.1.1 *COD* алгоритам

За успешну детекцију објекта од интереса *COD* класификатор се састоји од великог броја позитивних и негативних узорака који фигуришу у поступку обучавања (обуке). Обука се састоји од узорака који се означавају селекцијом сегмената од интереса (Слика 5.6). У оквиру ове дисертације процес обуке код оба примењена алгорита састојао се од преко 5000 узорака, сачињених од синтетичких и реалних радарграма.



Слика 5.6 Селекција позитивних узорака користећи сегменте од интереса

Класификатор има задатак да у што краћем временском периоду издвоји потенцијалне сегменте од интереса (СОИ) и проследи их у наредни корак алгорита. У процесу претраге *COD* алгоритам дели улазну слику на већи број мањих сегмената. Померањем прозора претраге сваки анализирани сегмент се класификује као објекат или не-објекат [73]. За случај да је анализирани сегмент класификован као не-објекат, детектор помера прозор претраге на следећу локацију. У супротном, анализирани сегмент се прослеђује у следећу

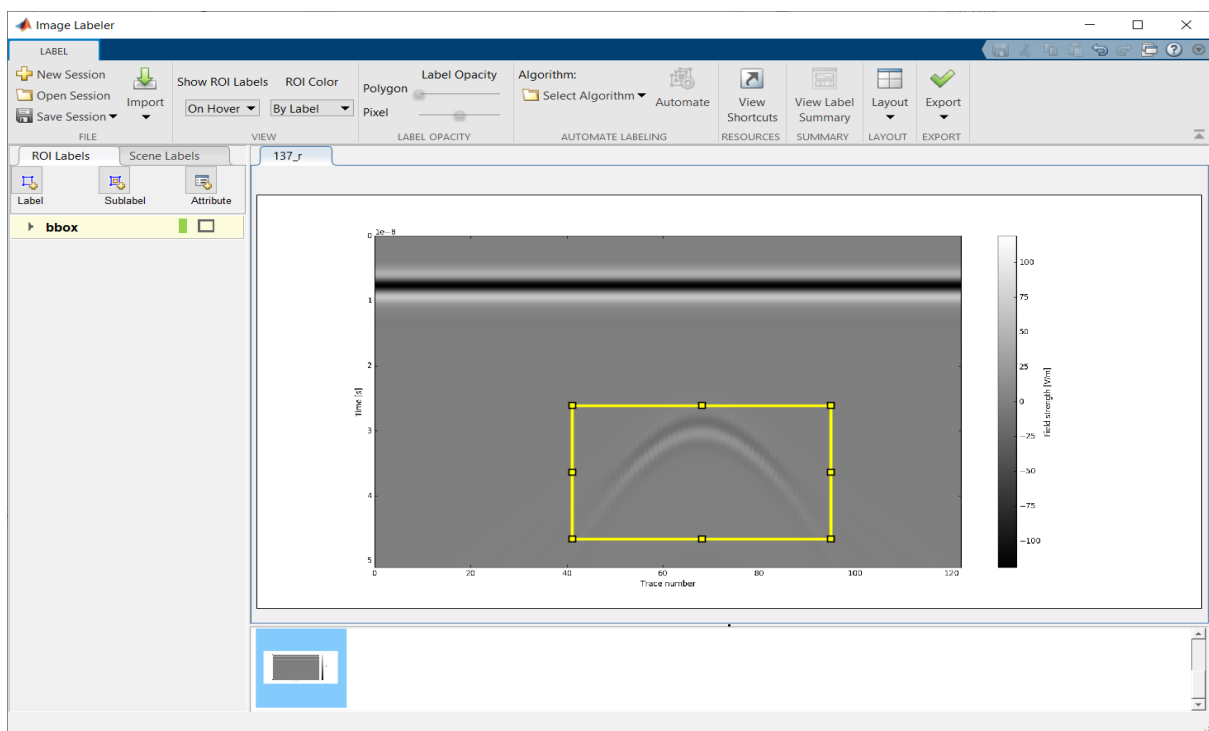
фазу, јер потенцијално садржи објекат од интереса. Сегменти који се задрже и у завршној фази подразумевају сегменте радарграма који садрже објекат од интереса.

MatLAB код са параметрима коришћеним за креирање *COD* обука има следећи облик:

```
trainCascadeObjectDetector('nazivObuke', data, negativeFolder, ...
    .
    'ObjectTrainingSize', 'Auto', ...
    'NumCascadeStages', 10, ...
    'FalseAlarmRate', 0.5, ...
    'TruePositiveRate', 0.995, ...
    'FeatureType', 'HOG');
```

5.3.1.1.2 *Faster R-CNN*

Процес обуке код *Faster R-CNN* мреже састојао се од истих узорака као и код *COD* алгоритма. Приказ селекције сегмената од интереса извршен је на у оквиру графичког окружења *Image Labeler* (Слика 5.7).



Слика 5.7 Пример селекције позитивних узорака обуке

Као резултат селекције сегмената од интереса добија се *MatLAB* структура сачињена од два поља. У првом пољу чувају се апсолутне путање до радарграма који фигуришу у обуци а у другом пољу се смештају матрице у којима се чувају оквири сегмената сваког узорака у обуци. Свака матрица представља по један оквиру СОИ који се дефинише преко индекса врсте и колоне горњег левог угла СОИ, његове ширине и висине. Формирана структура представља основни улазни податак за обуку конволуционе неуронске мреже.

5.3.1.1.3 Креирање обука

За детекцију хиперболичних рефлексива на радарграму у практичном делу дисертације извршено је скенирање 850 реалних радарграма. Поред тога, генерисано је и 3334 синтетичка радарграма. Како би број реалних и синтетичких радарграма био исти извршено је повећање броја реалних радарграма применом хоризонталног ротирања (енг. *flipping*) и скалирања. На основу ових узорака креиране су 42 обуке (21 обука применом *COD* алгоритма и 21 обука применом *fasterR-CNN* модела) (Табела 5.5), и то:

- Обуке сачињене само од реалних радарграма (300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 и 2000 узорка).
- Обуке сачињене само од синтетичких радарграма (300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 и 2000 узорка).
- Обуке сачињене комбинацијом синтетичких и реалних радарграма (300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 и 2000 узорка)

Табела 5.5 Структура и број узорака у креираним обукама

Ознака обуке	Број узорака		
	Реални	Синтетички	Укупно
#1	300	0	300
#2	150	150	300
#3	0	300	300
#4	600	0	600
#5	300	300	600
#6	0	600	600
#7	900	0	900
#8	450	450	900
#9	0	900	900
#10	1200	0	1200
#11	600	600	1200
#12	0	1200	1200
#13	1500	0	1500
#14	750	750	1500
#15	0	1500	1500
#16	1800	0	1800
#17	900	900	1800
#18	0	1800	1800
#19	2000	0	2000
#20	1000	1000	2000
#21	0	2000	2000

Процесирање је извршено на рачунару са следећим спецификацијама:

- Процесор: *AMD Ryzen 7 5800X 8-Core Processor*
- РАМ меморија: *16GB*

У Табели 5.6 приказано је време потребно за креирање сваког детектора засебно.

Табела 5.6 Време потребно за креирање детектора

<i>Cascade Object Detector (COD)</i>							
<i>РЕАЛНИ УЗОРЦИ</i>							
<i>број узорака</i>	300	600	900	1200	1500	1800	2000
<i>[s]</i>	11.50	23.83	43.66	54.08	68.36	81.77	102.37
<i>СИНТЕТИЧКИ УЗОРЦИ</i>							
<i>број узорака</i>	300	600	900	1200	1500	1800	2000
<i>[s]</i>	7.99	16.46	24.45	32.51	43.71	51.46	57.27
<i>КОМБИНОВАНИ УЗОРЦИ</i>							
<i>број узорака</i>	300	600	900	1200	1500	1800	2000
<i>[s]</i>	8.06	20.44	28.44	43.73	55.23	70.04	84.56
<i>fasterR-CNN</i>							
<i>укупан број узорака</i>	500	1000	1500	2000	2500	3000	3334
<i>тренинг сет (60%)</i>	300	600	900	1200	1500	1800	2000
<i>валидација (10%)</i>	50	100	150	200	250	300	334
<i>тест (30%)</i>	150	300	450	600	750	900	1000
<i>РЕАЛНИ УЗОРЦИ</i>							
<i>[h:min:sek]</i>	1:14:20	3:20:49	5:53:18	9:23:35	12:20:15	16:07:14	21:41:22
<i>СИНТЕТИЧКИ УЗОРЦИ</i>							
<i>[h:min:sek]</i>	0:46:33	2:51:16	4:11:47	7:30:30	12:42:13	15:50:11	18:53:00
<i>КОМБИНОВАНИ УЗОРЦИ</i>							
<i>[h:min:sek]</i>	1:16:55	3:03:06	5:14:36	9:23:35	13:19:06	18:46:57	20:32:41

На основу времена потребног за креирање детектора уочава се да је време потребно за креирање *COD* детектора са истим бројем узорака неупоредиво брже у поређењу са креирањем *fasterR-CNN* детектора. Код *COD* детектора најдуже време креирања детектора је мање од два минута, за разлику од креирања *fasterR-CNN* детектора за који је било потребно нешто мање од 22 сата.

Укупно време потребно за креирање свих детектора у оквиру дисертације износи:

- *COD*: $\approx 16min$,
- *fasterR-CNN* $\approx 200h$.

5.3.1.1.4 Креирање синтетичких радарграма

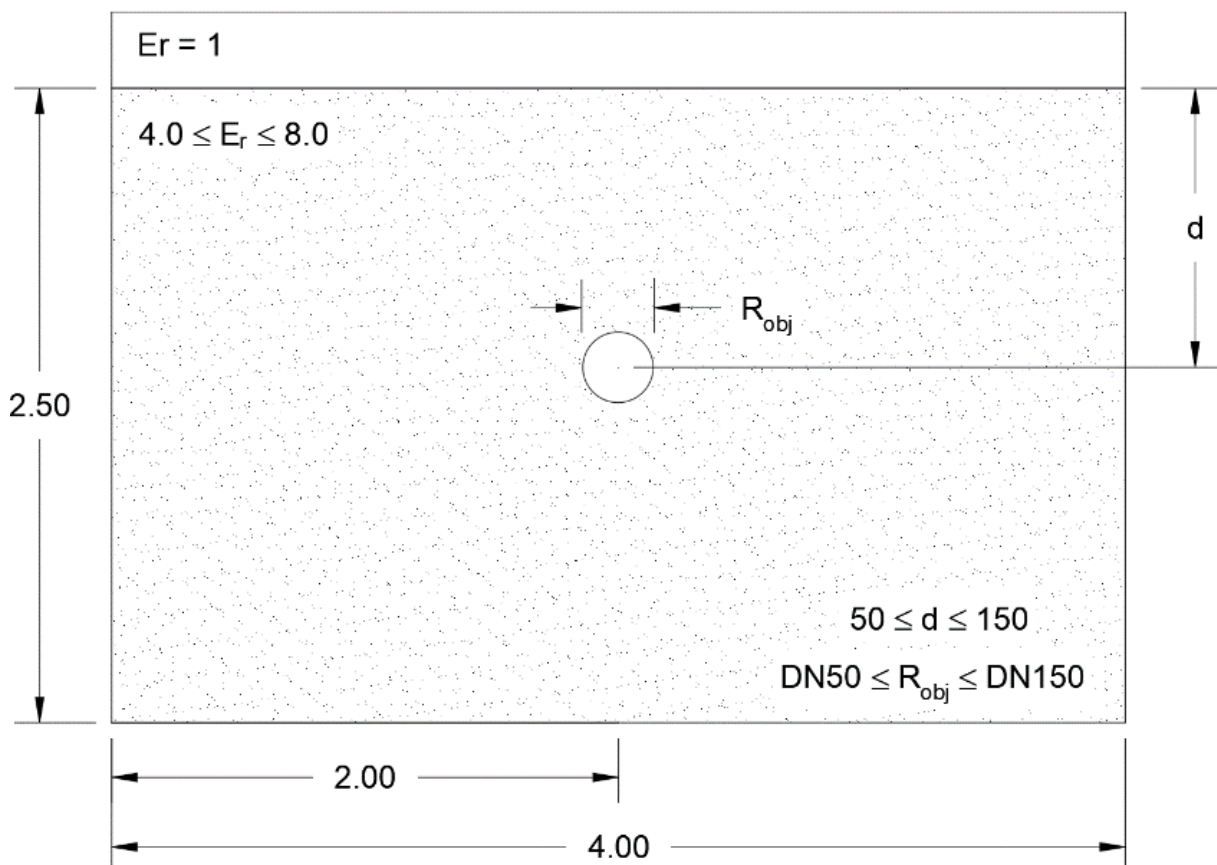
Креирање синтетичких радарграма извршено је варирајући кључне параметре који утичу на облик, амплитуду рефлектованог сигнала и димензије хиперболичних рефлексија, и то:

- дубина објекта,
- радијус објекта и
- окружење (медиј у коме се објекат налази).

Параметри за генерисање синтетичких радарграма усклађени су у односу на узорковне реалне радарграме. Граничне вредности променљивих параметара код генерисања синтетичких радарграма су следеће:

- Дубина објекта: $0.5-1.5m$
- Радијус објекта: $DN50-DN150$
- Окружење (диелектрична константа): 4-8

На Слици 5.8 је приказан сценарио са претходно дефинисаним граничним вредностима параметара који су се мењали у улазним *.in* фајловима за генерисање синтетичких радарграма.



Слика 5.8 Изглед сценарија за генерисање синтетичких радарграма

Дубина објекта варирана у опсегу од 0.5 до $1.5m$, са инкрементом $0.03m$. Одабир овог опсега изабран је у складу са препорученим дубинама укопавања објектата тако да обухвата већински домен препоручених вредности (Табела

2.2). За радијус су преузете стандардне вредности из Табеле 2.1 најчешће коришћених димензија подземних вода. Као последњи параметар, изабране су вредности диелектричне константе из опсега 4-8, које се често срећу у пракси. Увећање диелектричне константе вршено је са кораком 0.2.

Комбинујући параметре са наведеним корацама инкремента креирано је укупно 3334 синтетичка радарграма. Овај број синтетичких радарграма изабран је и због заокруживања узорака за обуку на целобројну вредност (2000), што представља 60% узорака од укупног броја синтетичких радарграма који се користи за обуку код *fasterR-CNN* модела.

Време процесирања синтетичких радарграма

Просечно време генерисања једног синтетичког радарграма било је 40 минута. То значи да се укупно време генерисања свих синтетичких радарграма (3334) може израчунати према следећем изразу:

$$\text{Укупно време} = 40 * 3334 = 136\ 360 \text{ [min]} \approx 2273 \text{ [h]} \approx \mathbf{95 \text{ дана}} \quad (5.8)$$

Код радарграма веће зашумљености и поред квалитетне обуке може доћи до детекције већег или мањег броја сегмената од интереса у односу на стварни број. Мања детекција сегмената од интереса представља већи проблем, који се може побољшати или превазићи додатним филтрирањем радарграма или побољшањем обуке. Код већег броја сегмената од интереса постоје два могућа сценарија:

1. Селекција истих сегмената радарграма које садрже објекат од интереса са већим или мањим оквирима и
2. Селекција додатних сегмената радарграма који не садрже објекат од интереса.

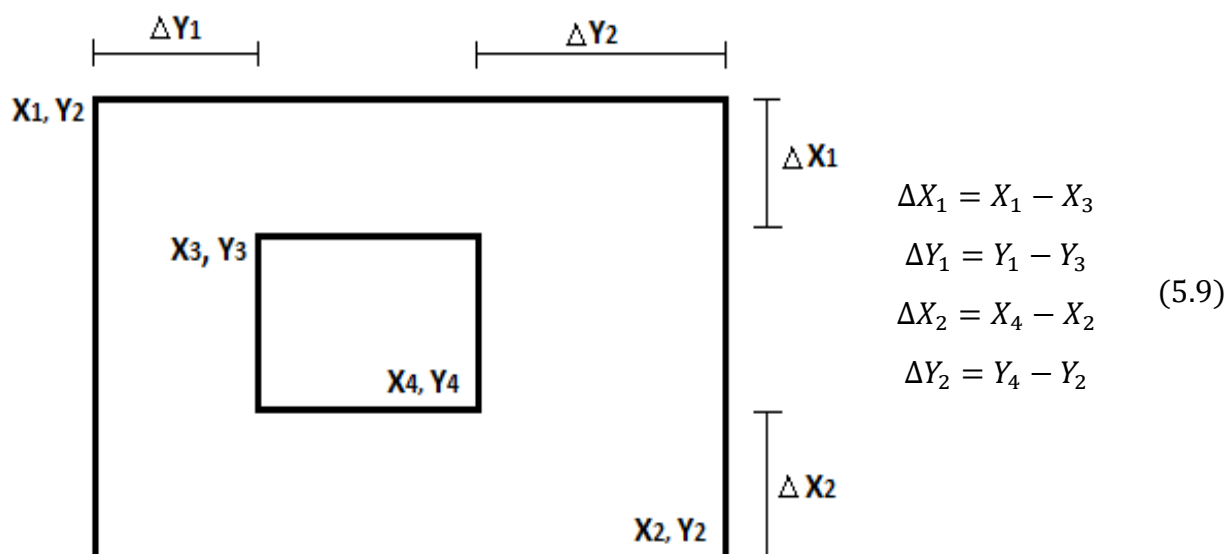
Како би алгоритам превазишао наведени проблем у наредној фази се врши елиминација дуплираних сегмената.

5.3.1.2 ФАЗА 2: Елиминација дуплих СОИ

Као резултат зонске сегментације радарграма иста хиперболична рефлексација може бити селектована са више различитих СОИ. Већи број селекција истих хиперболичних рефлексација има негативан утицај на перформансе алгоритма. Стога је неопходно да се у оквиру ове фазе алгоритма препознају дуплирани СОИ и да се изврши њихова елиминација.

Додатни проблем настаје када се суседни СОИ секу (делимично или потпуно преклапају), што је карактеристично када је више хиперболичних рефлексација у близини. Тада је неопходно задржати оба оквира СОИ. На основу свега изложеног, потребно је оптимизовати укупан број СОИ додатном

елиминацијом СОИ који су у потпуности садржани један у другом. У том циљу формирају се координатне разлике између горњих левих и доњих десних координата оквира СОИ (Слика 5.9), према изразима 5.9.



Слика 5.9 Координатне разлике два СОИ са различитим димензијама оквира

На основу срачунатих координатних разлика проверавају се услови дефинисани према следећем изразу:

$$\Delta X_1 < 0 \wedge \Delta Y_1 < 0 \wedge \Delta X_2 < 0 \wedge \Delta Y_2 < 0 \quad (5.10)$$

Ако су испуњени сви претходно дефинисани услови такав СОИ се брише и не улази у наредну фазу алгорита.

5.3.1.3 ФАЗА 3: Елиминација хомогених СОИ

Применом прве две фазе алгорита може се догодити да хиперболична рефлексија на радарграму не буде детектована ни са једним СОИ. Смањење процента овог негативног утицаја врши се побољшањем обуке или додатним предпроцесирањем радарграма. Побољшање обуке обично подразумева проширење са додатним узорцима или додатне поступке верификације постојећих обука, док су поступци додатног предпроцесирања обично базирани на примени неких од постојећих филтера улазних података.

Са друге стране негативан утицај представљају и СОИ који не садрже објекат од интереса (лажна позитивна детекција). Препознавање ових СОИ може да се врши анализом степена контраста (израз 5.11), као односа минималне и максималне вредности интензитета пиксела унутар сваког СОИ.

$$\text{Степен контраста} = \frac{\min(SOI_i)}{\max(SOI_i)} \quad (5.11)$$

Код приближно хомогених зона радарграма (без веће промене интензитета пиксела) степен контраста тежи јединици. Степен контраста није исти за

објекте сачињене од различитих материјала или различитих диелектричних константи земљишта које окружује посматрани објекат (нпр. степен контраста је већи код металних објеката). Такође и у случају неметалних цеви испуњених гасом долази до фазне инверзије која изазива додатно повећање степена контраста. Увођењем граничне вредности за степен контраста број издвојених СОИ за наредну фазу алгоритма се додатно редукује. За одређивање граничне вредности степена контраста анализирано је 25 реалних радарграма (График 5.4).

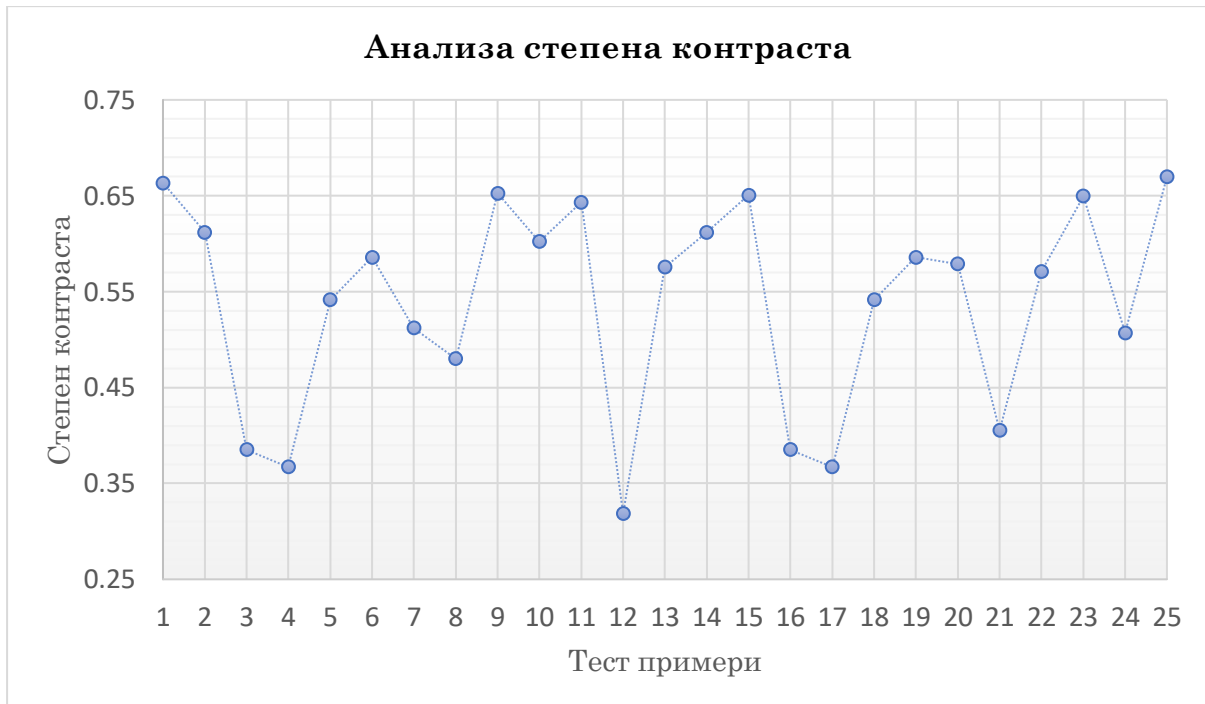


График 5.4 Анализа степена контраста

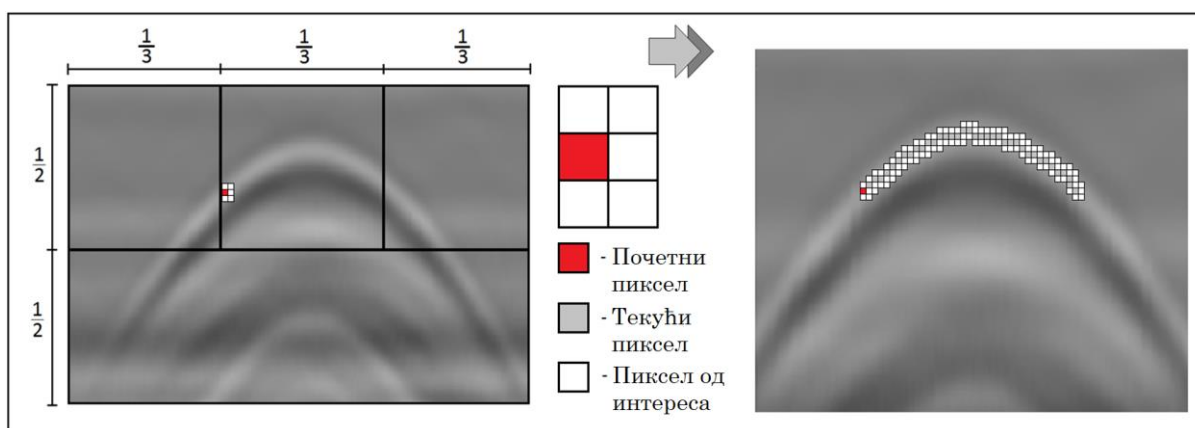
На основу извршене анализе уочава се да је однос минималне и максималне вредности интензитета рефлектованог сигнала унутар издвојених сегмената од интереса у распону од 0.30 – 0.71. Како би се узеле у обзир све хиперболичне рефлексије за граничну вредност елиминације хомогених зона усваја се емпиријска вредност од 0.75. На овај начин могу се задржати и сегменти који не садрже објекат од интереса али је смањена вероватноћа елиминације сегмената који садрже корисне информације.

Применом *CNN* добија се процентуална процена вероватноће постојања објекта унутар скаког издвојеног СОИ. Овај проценат може такође да се искористи као гранична вредност за елиминацију СОИ који су испод задате граничне вредности.

5.3.1.4 ФАЗА 4: Проналазак приближних координата темена хиперболичних рефлексција

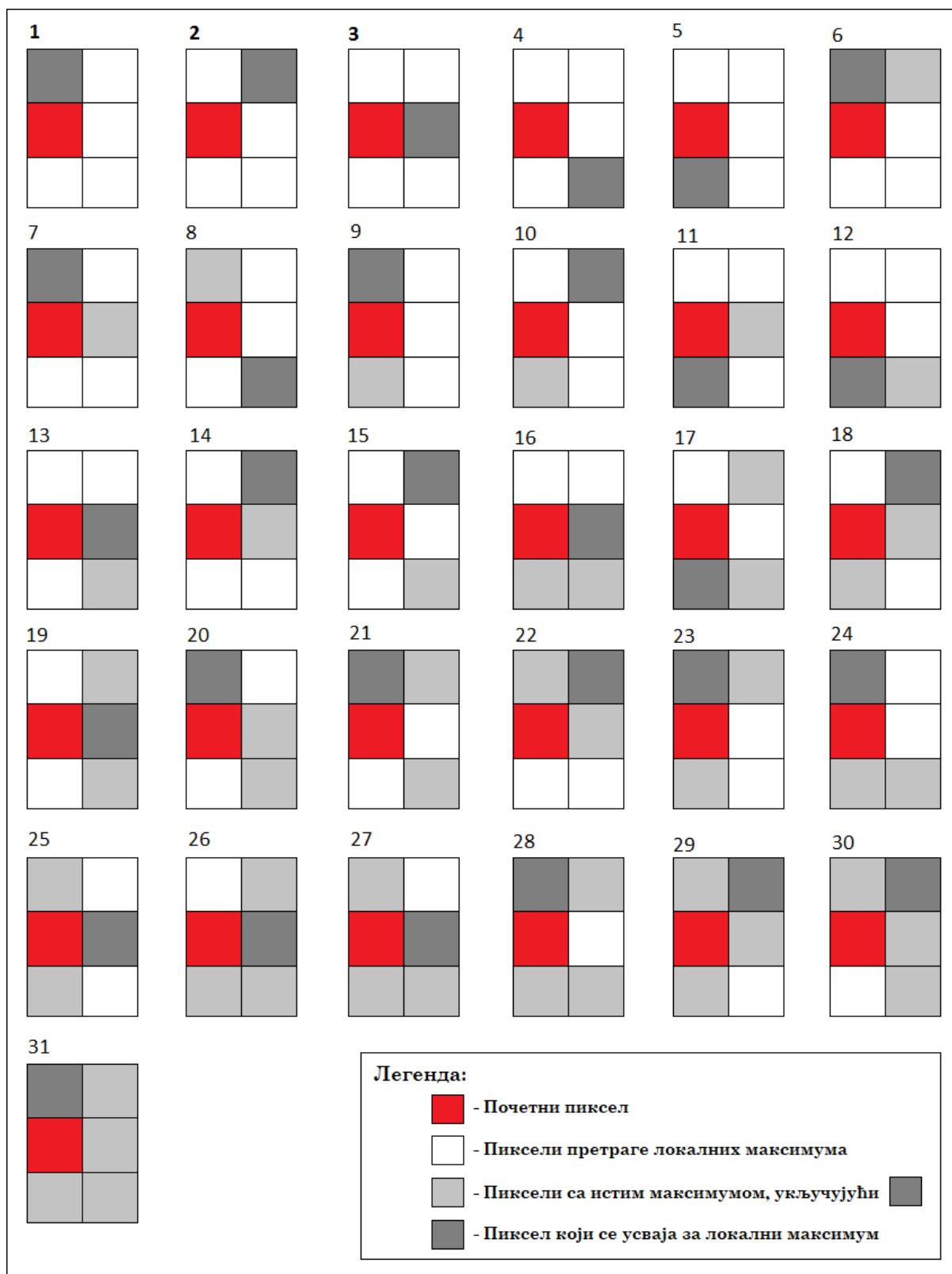
Издвојени СОИ из претходне фазе алгоритма заједно са радарграмом представљају улазне податке за ову фазу у којој се врши проналазак приближних координата темена хиперболичних рефлексција. За овај задатак у наставку се анализирају СОИ и описује начин претраге локалних максимума који представљају основни сет улазних података за проналазак координата темена.

Ако се посматра један оквир издвојеног СОИ, он се дели на два једнака дела по вертикалној и три једнака дела по хоризонталној оси (Слика 5.10). У наставку се анализира горња половина СОИ где се претражује пиксел са највећим интензитетом у колони између првог и другог дела подељеног СОИ (по хоризонтали). Пронађени пиксел представља почетак претраге темена хиперболичне рефлексције (црвени пиксел на Сlici 5.10).



Слика 5.10 Издвојени сегмент од интереса (СОИ)

У наставку се анализа не ограничава на димензије издвојеног СОИ већ се радарграм посматра у целини. Ако се посматра положај пронађеног почетног пиксела очекује се да је теме хиперболичне рефлексције у десном делу оригиналног радарграма. Стога се даља претрага координата темена ограничава у том смеру. Ово ограничење се врши тако што се око почетног пиксела формира субматрица димензија 3×2 , где почетни пиксел заузима позицију друге врсте и прве колоне посматране субматрице (црвени пиксел на Сlici 5.10). Од преосталих пет пиксела издвојене субматрице (бели пиксели на Сlici 5.10) проналази се локални максимум (сиви пиксели на Сlici 5.10). Претрага локалних максимума у наставку врши се померањем субматрице за један корак на начин да текући локални максимум у наредној итерацији заузима позицију друге врсте и прве колоне издвојене субматрице. За проналазак локалног максимума постоји 31 могући сценарио према критеријуму интензитета околних пиксела претраге (Слика 5.11).



Слика 5.11 Претрага локалних максимума на десну страну код субматрице димензија 3×2

У првих пет могућих комбинација претраге локалног максимума постоји јединствен пиксел са највећим интензитетом записа рефлектованог сигнала

(Слика 5.11). У овом случају једнозначно је одређена позиција наредног локалног максимума. Међутим, код целобројних вредности записа интензитета пиксела може се десити да суседни пиксели имају исте вредности интензитета (светло сиви пиксели на Слици 5.11). Ови случајеви уносе додатне компликације код проналаска наредног локалног максимума. Комбинације од 6-15 имају по два пиксела са највећим и истим вредностима интензитета у зони претраге. Код тих комбинација алгоритам треба да одлучи који од та два пиксела ће се усвојити за текући локални максимум. У наставку, од 16-25 постоје по три пиксела са истим максималним интензитетом, док се од 26-30 налазе по четири таква пиксела. Последња комбинација има свих пет пиксела претраге са истим интензитетом.

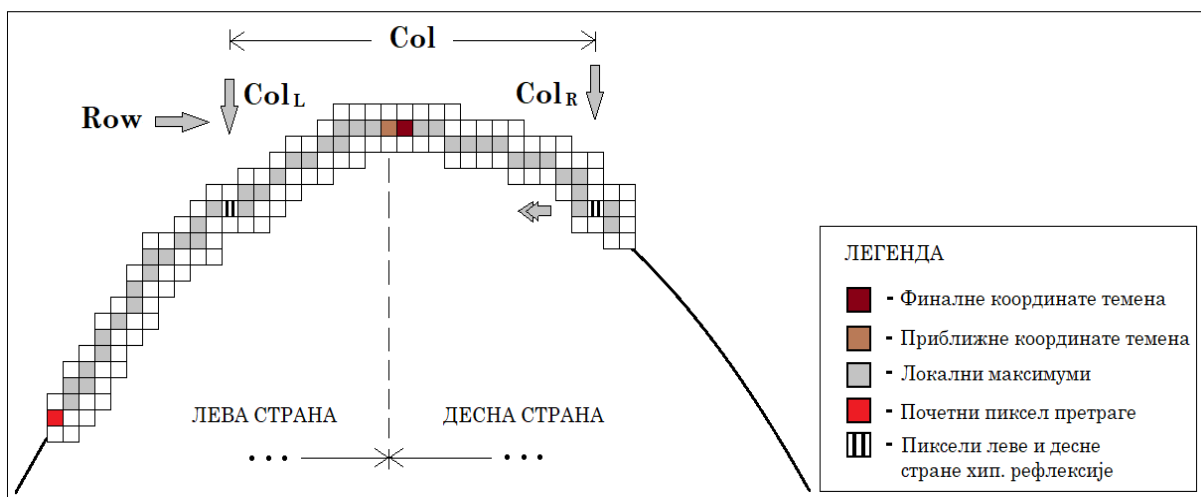
На основу низа анализираних тест примера закључује се да није увек пиксел из средине субматрице најбоље решење, као што је то случај код комбинација 16, 20 или 31. Стога се за наредни локални максимум често усваја пиксел из прве врсте издвојене субматрице, како се претрага не би почела „спуштати“ пре стварних координата темена. У циљу додатне контроле одређивања координата темена алгоритам може да изврши претрагу и на леву страну. Код ове провере почетни пиксел претраге налази се у колони између друге и треће целине подељене субматрице. У овом случају претрага локалних максимума је идентична као на десну страну са симетричним комбинацијама претраге у односу на прву колону. То значи да локални максимум увек заузима позицију друге колоне и друге врсте посматране субматрице.

Применом претходно објашњеног начина претраге координата темена циљ је да се померање субматрице из итерације у итерацију врши на десно или на горе (са опадајућим индексом врсте) док се не дође до координата темена. У оквиру алгоритма формулисан је услов којим се врши препознавање када је алгоритам досегао врсту у којој се налази теме анализираних хиперболичне рефлексије. За ову детекцију уводи се нова променљива која врши инкрементално сумирање за случај да је индекс врсте локалног максимума остао исти или се повећава у наредним итерацијама. У супротном, вредност ове променљиве се ресетује на нулу. Гранична вредност ове променљиве није иста за све радарграме. Она првенствено зависи од броја одбирака по једном *scan*-у [14]. За радарграме са 512 одбирака/*scan*-у пет представља оптималну граничну вредност. То значи да се претрага локалних максимума прекида када се индекс врсте повећа узастопно до пет врста. Овде важи правило директне пропорције, што значи да се повећањем параметра одбирака по *scan*-у повећава и гранична вредност. За 1024 одбирака/*scan*-у гранична вредност се удвостручава.

Када се достигне претходно дефинисано ограничење алгоритам престаје са претрагом локалних максимума. Сада је потребно одредити јединствену врсту и колону која дефинише теме хиперболичне рефлексије. У ту сврху као улазни сет података користе се локални максимуми који су пронађени у претходном

кораку. Врста са најмањим индексом се усваја за коначну врсту темена хиперболичне рефлексije, док аритметичка средина индекса пиксела који се налазе у овој врсти представља приближну колону темена. На основу усвојене врсте и колоне врши се груба подела претходног сета података на леву и десну страну хиперболичне рефлексije (Слика 5.12). Пиксели са мањим индексом колоне у односу на индекс приближне колоне темена сврставају се у леву страну а пиксели са већим индексима у десну страну хиперболичне рефлексije. Затим се рачуна аритметичка средина индекса колоне пиксела који се налазе у предпоследњој врсти десне стране хиперболичне рефлексije (Col_R). У наставку се проналази аритметичка средина пиксела који се налазе у истој врсти супротне групе тачака (лева страна хиперболичне рефлексije) (Col_L). Коначна колона темена хиперболичне рефлексije рачуна се према (5.12):

$$Col = \frac{Col_l + Col_r}{2} \quad (5.12)$$



Слика 5.12 Проналазак колоне темена хиперболичне рефлексije

Усвајањем колоне према изразу (5.12) алгоритам се само делимично ослања на симетричност крака хиперболичне рефлексije. Ова тврдња проистиче из чињенице да се дефинисани услов испуњава у непосредној околини темена. То значи да несиметричност крака хиперболичне рефлексije испод граничне врсте нема утицај на одређивање координата темена хиперболичне рефлексije. Грешке које настају код одређивања колоне зависе само од граничне врсте. За свођење ове грешке на минимум алгоритам врши додатну проверу колоне приближног темена и темена које се усваја као финално, при чему ове колоне морају бити блиске.

5.3.1.5 Резиме

У првом делу Поглавља 5.1 приказан је блок дијаграм првог алгоритма за одређивање координата темена хиперболичних рефлексја. Предлог првог алгоритма базиран је на зонској сегментацији радарграма која се врши на основу *COD* алгоритма или конволуционих неуронских мрежа. Поред зонске сегментације радарграма као прве фазе алгоритам је сачињен из још три додатне фазе: елиминација дуплих СОИ, елиминација хомогених СОИ и проналазак координата темена хиперболичних рефлексја.

Код прве фазе алгоритма акценат је стављен на процес обуке, као и време које је било потребно за генерисање синтетичких радарграма. У другој фази објашњен је и приказан услов за елиминацију дуплих СОИ. Кроз трећу фазу анализиран је степен контраста у циљу елиминације хомогених зона СОИ, док је у завршној (четвртој) фази приказан и објашњен начин одређивања локалних максимума као и одређивање приближних и финалних координата темена хиперболичних рефлексја. Све наведене фазе алгоритма представљају иновативно решење за проналазак координата темена хиперболичних рефлексја, осим прве фазе у којој су коришћени постојећи алгоритми за зонску сегментацију радарграма. Допринос у првој фази огледа се у креираним узорцима (синтетички и реални радарграми) за обуку.

Претходно описани алгоритам карактерише процесирање у блиско реалном времену као и одређивање јединствених координата темена хиперболичних рефлексја. Основни недостатак зонске сегментације радарграма је зависност од обуке. То значи да се за хиперболичне рефлексје које нису детектоване на основу обуке не могу одредити координате темена. Квалитетна обука захтева велик број позитивних и негативних узорака. Проблем се огледа у томе што реални радарграми садрже одређен проценат шума те је отежано креирање јединствене обуке која ће обухватити све хиперболичне рефлексје, знајући да ширина крака и интензитет рефлектованог сигнала зависи од више параметара, попут: радијуса, дубине, материјала и медијума земљишта. Потенцијално решење огледа се у креирању обуке у комбинацији са синтетичким радарграмима за специјализован тип хиперболичне рефлексје, што је и имплементирано у овом алгоритму. Предности овог приступа огледају се у следећем:

- Хиперболичне рефлексје се могу генерисати за произвољан сценарио,
- Узорци за обуку не садрже шум који постоји у реалним радарграмима.

У наставку дисертације анализира се предлог другог алгоритма за проналазак координата темена хиперболичних рефлексја који не зависи од обуке.

5.3.2 Алгоритам 2 - *gprCAPEX*

Развој другог алгоритма под називом *gprCAPEX*, настао спајањем три термина: *GPR*, *Canpy* и *APEX*, базира се на тачкастој сегментацији радарграма. Овакав приступ елиминисао потребу за обуком и на тај начин се превазилази највећи проблем првог предложеног алгоритма а то је зависност од квалитета обуке. Поред тога, врши се квалитетна сегментација радарграма без обзира на улазне податке (димензије објеката, материјал и слично). С обзиром на анализу из Поглавља 4.9 за ову врсту сегментације предлаже се примена *Canpy* детектора ивица и креирање пажљиво одабраних критеријума за даљу елиминацију ивичних пиксела.

Canpy детектор се примењује над комплетним радарграмом, без зонске сегментације. Број почетних ивичних пиксела првенствено зависи од два параметра аквизиције: броја одбирака/*scan*-у и *scan/m*. Додатна сегментација подразумева елиминацију ивичних пиксела, који теоријски не би могли бити темена хиперболичних рефлексија, попут ивичних пиксела насталих између два подповршинска слоја земљишта или тачака на крацима хиперболичних рефлексија. Основни проблем овог приступа, огледа се у проналаску оптималних вредности за додатну сегментацију, како би се у крајњој фази задржали само пиксели који карактеришу темена хиперболичних рефлексија. Током развоја и имплементације свих фаза приказаног алгоритма треба да се задовоље два основна захтева:

1. Процесирање кроз све фазе треба да се буде у блиско реалном времену.
2. Елиминација што већег броја ивичних пиксела који теоретски не могу бити ивични пиксели у непосредној околини темена хиперболичних рефлексија.

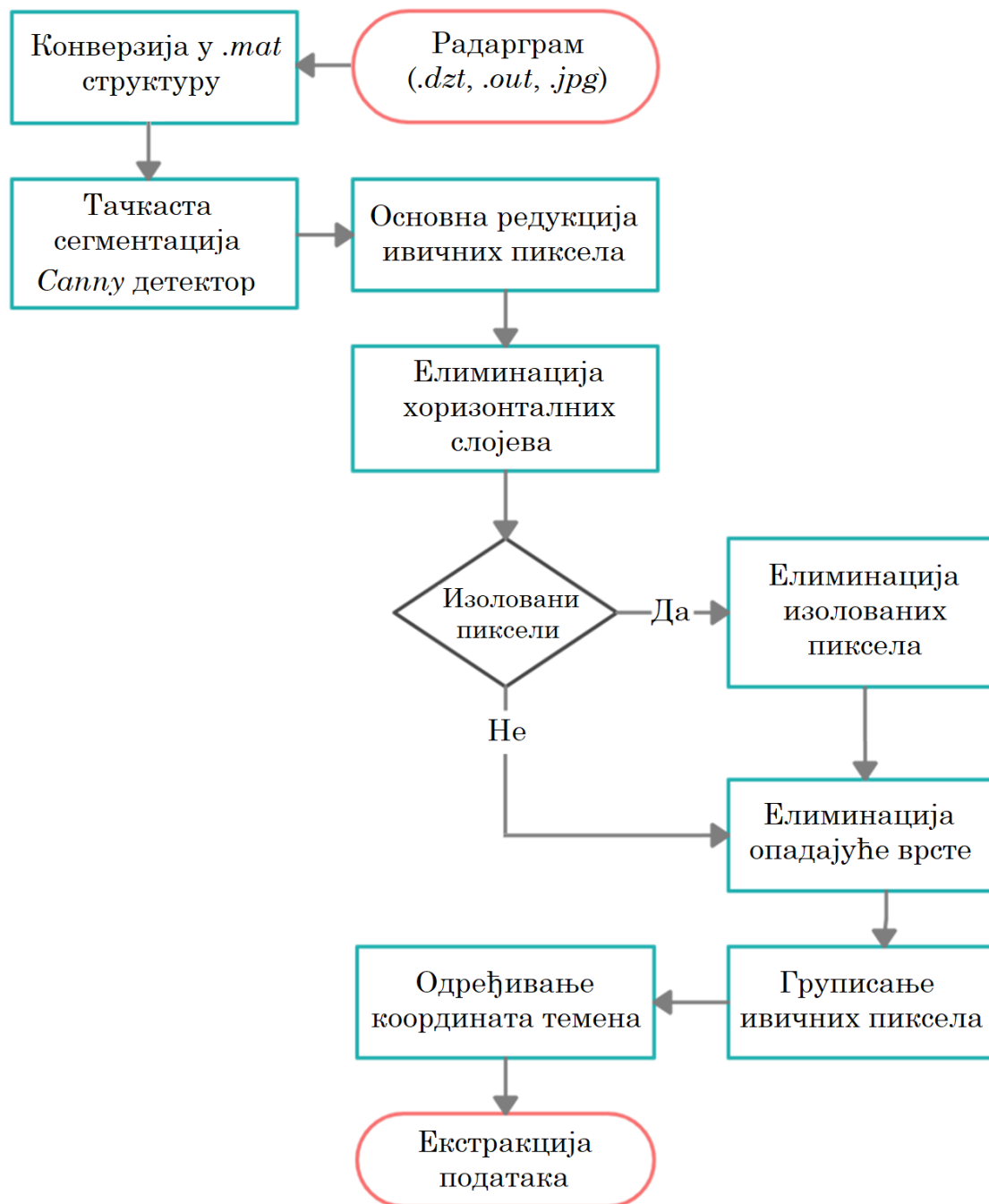
Имплементација другог алгоритма за проналазак координата темена хиперболичних рефлексија који је предложен у оквиру ове дисертације састоји се из две основне целине:

1. Тачкаста сегментација радарграма и
2. Проналазак координата темена хиперболичних рефлексија.

Поред основних целина, алгоритам се састоји и од неколико допунских фаза попут:

- конверзије улазних података,
- основне редукције ивичних пиксела,
- елиминације хоризонталних слојева,
- елиминације изолованих пиксела и пиксела са опадајућом врстом,
- груписања ивичних пиксела.

На Слици 5.13 је приказан блок дијаграм *gprCAPEX* алгоритма базираног на тачкастој сегментацији, који је предложен и имплементиран у оквиру ове дисертације.

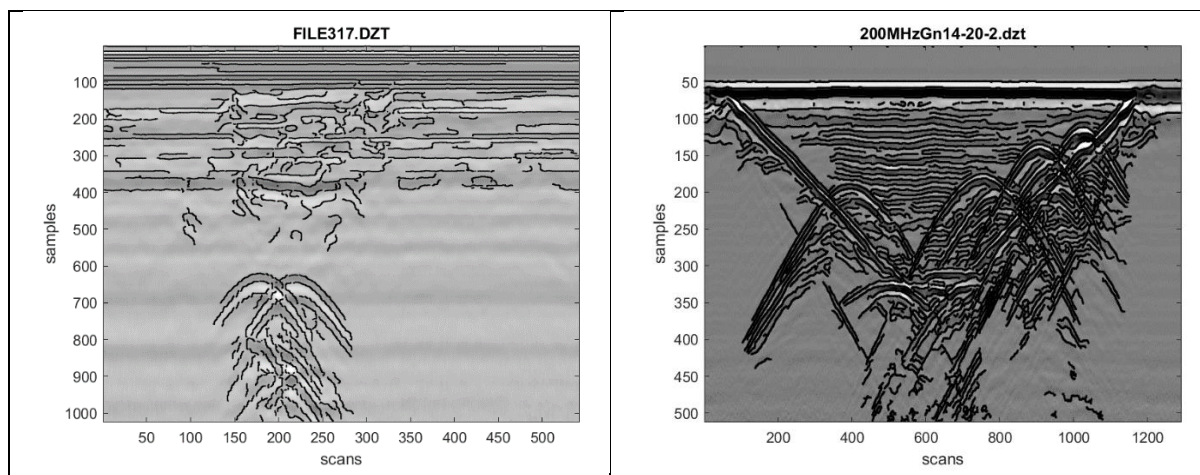


Слика 5.13 Блок дијаграм *gprCAPEX* алгоритма (Алгоритам 2)

На основу приказаног блок дијаграма уочава се да се предложени алгоритам састоји од неколико фаза. У наставку дисертације детаљније су анализиране све наведене фазе алгоритма.

5.3.2.1 ФАЗА 1: Тачкаста сегментација радарграма применом *Canny* детектора

Детекција ивичних пиксела једна је од најчешће коришћених операција у дигиталној обради слике, с обзиром да ивични пиксели дефинишу положај и облик објекта од интереса. Међу бројним детекторима ивичних пиксела који су предложени у стручној литератури и анализирани у Поглављу 4.9 изабран је *Canny* детектор. Основни разлог за одабир овог детектора огледа се у његовој успешној примени и у случајевима када слика садржи већи проценат шума. Резултат примене овог детектора представља 2Д матрицу бинарних вредности, која је истих димензија као и улазни радарграм. На местима детектованих ивичних пиксела уписује се вредност један док се на осталим местима уписује нула. *Canny* детектор ивица се у оквиру овог алгоритма за одређивање координата хиперболичних рефлексија примењује у првој фази. На Слици 5.14 приказан је резултат примене *Canny* детектора над два реална радарграма.



Слика 5.14 Резултат примене *Canny* детектора ивица над целокупним радарграмом

Примена *Canny* детектора у великој мери врши сегментацију улазних података. Са Графика 5.5 може се уочити да је та сегментација у просеку преко 92% у односу на укупан број пиксела анализираних радарграма.

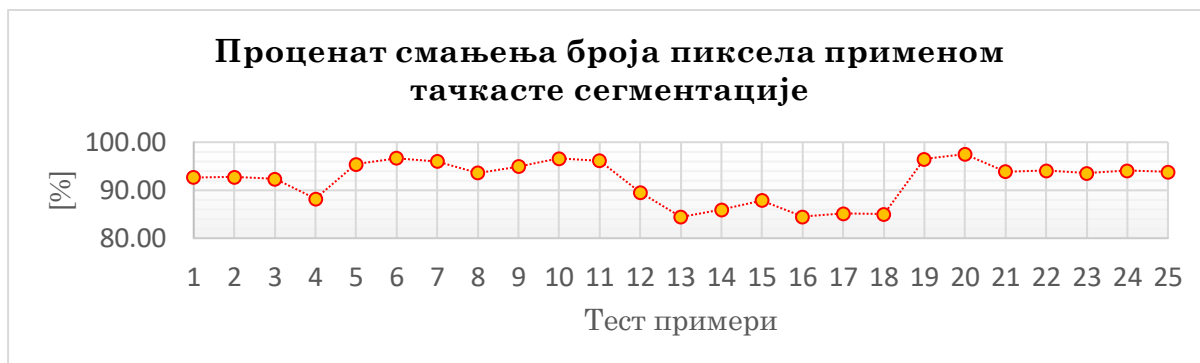


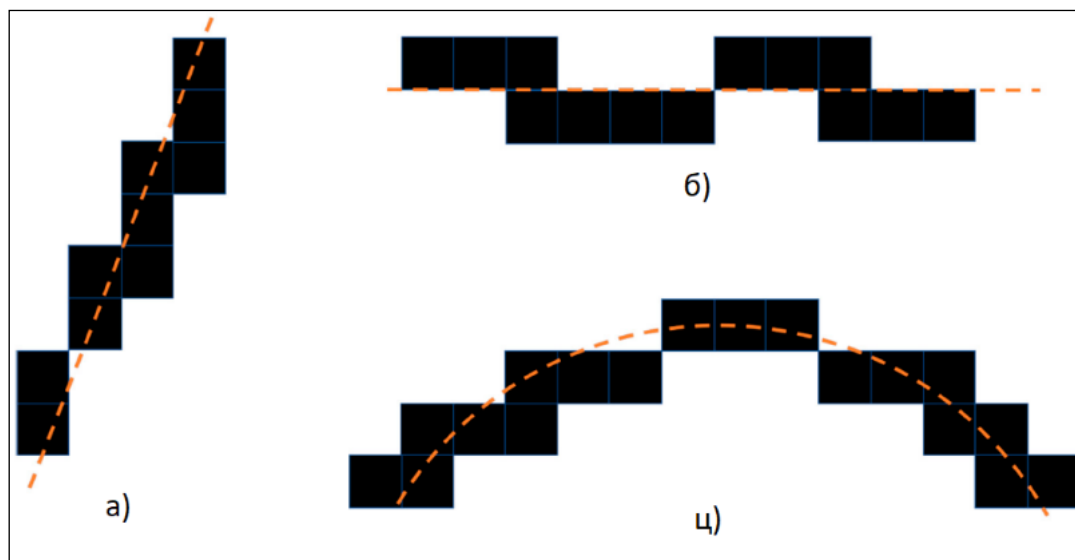
График 5.5 Процент сегментације радарграма применом *Canny* детектора ивица

Иако је проценат сегментације значајан (преко 84% на свим тест примерима) у циљу одређивања координата темена хиперболичних рефлексција потребно је извршити додатну сегментацију. Иновативни поступци додатне сегментације ивичних пиксела добијених у првој фази примењују се кроз неколико наредних фаза алгоритма (Слика 5.13).

5.3.2.2 ФАЗА 2: Основна редукција ивичних пиксела

У овој фази алгоритма, у циљу додатне сегментације ивичних пиксела из прве фазе креирани су специјализовани типови маске за морфолошке анализе. Креиране маске анализирају пикселе у непосредној околини сваког ивичног пиксела детектованог применом *Canny* детектора. Основни услов подразумева елиминацију ивичних пиксела који теоријски не би могли бити пиксели из непосредне околине темена хиперболичне рефлексije. Како би се детаљно испитали услови за препознавање ових пиксела, дефинисали изгледи маске и усвојила оптимална, било је неопходно извршити детаљну анализу сегментiranог радарграма добијеног као резултат примене *Canny* детектора. На основу ове анализе уочене су три основне групе ивичних пиксела:

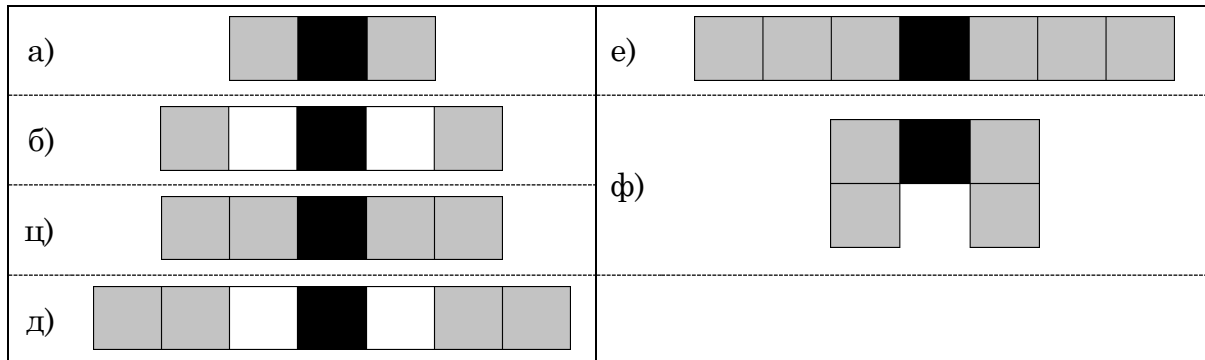
1. Групе ивичних пиксела које се могу апроксимирати са нагибном линеарном функцијом (Слика 5.15а)
2. Групе ивичних пиксела које су приближно хоризонталне и могу се апроксимирати са линеарном функцијом (Слика 5.15б)
3. Групе ивичних пиксела које се могу апроксимирати кривом другог реда (Слика 5.16ц)



Слика 5.15 Основне групе ивичних пиксела у радарграму

Узимајући у обзир ове три групе ивичних пиксела даља анализа базира се на проналаску одговарајуће маске која задржава ивичне пикселе у непосредној околини темена хиперболичних рефлексija (Слика 5.15ц), а остале у већој

мери елиминисхе. Овај корак обухвата препознавање и елиминацију ивичних пиксела из прве групе (а) и делимично из треће групе (ц) (елиминација ивичних пиксела на крацима хиперболичних рефлексии). Препознавање и елиминација ивичних пиксела из друге групе (б) врши се у наредној фази алгоритма. У циљу проналаска оптималне величине и облика анализирано је шест маски, које су приказане на Слици 5.16 [15].



Слика 5.16 Анализирани облици маски за претрагу непосредне околине ивичних пиксела

На претходно дефинисаним маскама црни квадрати представљају ивичне пикселе добијене применом *Canny* детектора, сиви дефинишу пикселе претраге, док бели представљају пикселе који се не анализирају. Основни морфолошки услов подразумева испитивање вредности сивих пиксела у дефинисаним маскама. Уколико је бар један „сиви“ пиксел ивични, анализиран пиксел се задржава. У супротном, на место анализираних ивичних пиксела се уписује нула. Маска А – Маска Е анализирају суседне пикселе са леве и десне стране ивичног пиксела у истој врсти, за разлику од „Маска Ф“ која обухвата по две врсте. Маска А и Маска Б врши претрагу по једног пиксела са обе стране. Разлика се огледа у томе да Маска А проверава пикселе из прве суседне колоне, док Маска Б проверава пикселе из друге суседне колоне. Када се Маска А и Маска Б прошире са по још једним пикселем за проверу, из суседних колона са обе стране, формирају се Маска Ц и Маска Д. Ако се Маска Ц прошири са по још једним пикселем из суседних колона добија се Маска Е. Последња Маска Ф проверава по два пиксела и они се формирају када се Маска А прошири са по још једним пикселем са обе стране у наредној врсти.

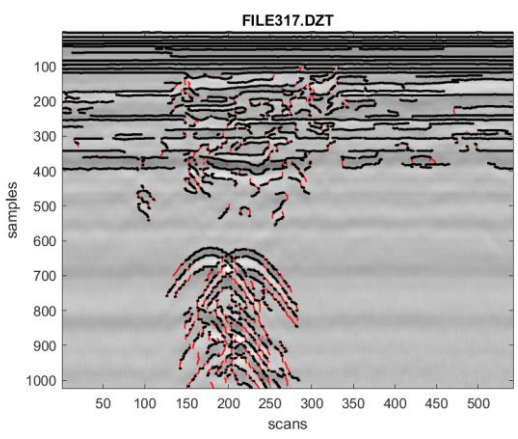
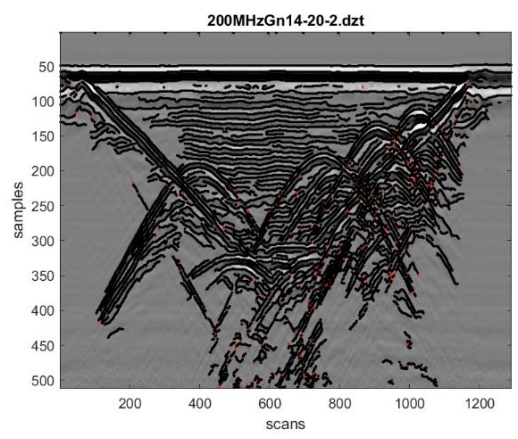
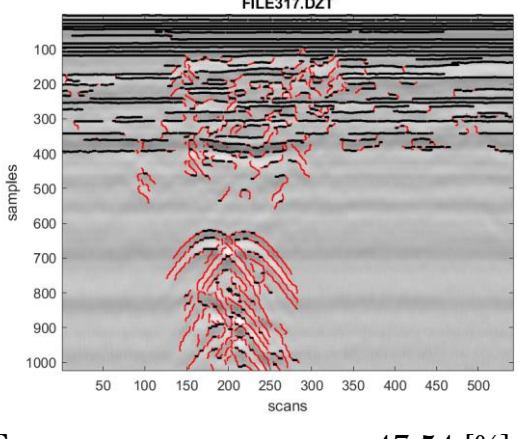
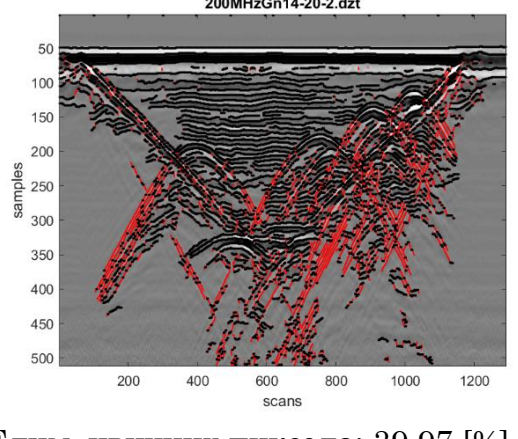
На основу дефинисаних маски за претрагу потребно је извршити детаљну анализу и донети закључак који од дефинисаних облика и величина маски претраге даје најбоље (оптималне) резултате. Најбоља маска подразумева испуњавање два основна услова:

- а) Елиминација већег броја ивичних пиксела уз задржавање ивичних пиксела у непосредној околини хиперболичне рефлексии и
- б) Процесирање у блиско реалном времену.

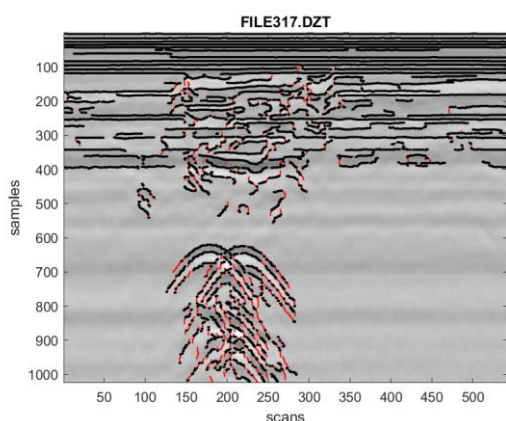
Додатни услов: боље је елиминисати мањи број ивичних пиксела, него извршити елиминацију свих ивичних пиксела који се налазе у непосредној околини темена хиперболичне рефлексације.

У наставку дисертације (Табела 5.7), кроз два репрезентативна примера приказани су резултати примене предложених маски. Први радарграм је мале сложености, садржи две хиперболичне рефлексације и неколико хоризонталних слојева, без већег утицаја шума, док је други радарграм веће сложености, садржи пет хиперболичних рефлексација, има висок проценат шума и преклапање крака суседних хиперболичних рефлексација.

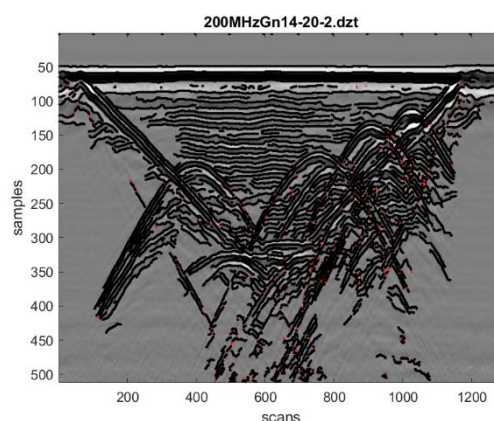
Табела 5.7 Резултат примене предложених маски над два репрезентативна примера

Реални радарграми	
ПРИМЕР 1	ПРИМЕР 2
Маска А	
 <p>Елим. ивичних пиксела: 30.03 [%] Време процесирања: 0.026 [s]</p>	 <p>Елим. ивичних пиксела: 6.03 [%] Време процесирања: 0.065 [s]</p>
Маска Б	
 <p>Елим. ивичних пиксела: 47.54 [%] Време процесирања: 0.001 [s]</p>	 <p>Елим. ивичних пиксела: 39.97 [%] Време процесирања: 0.004 [s]</p>

Маска Ц

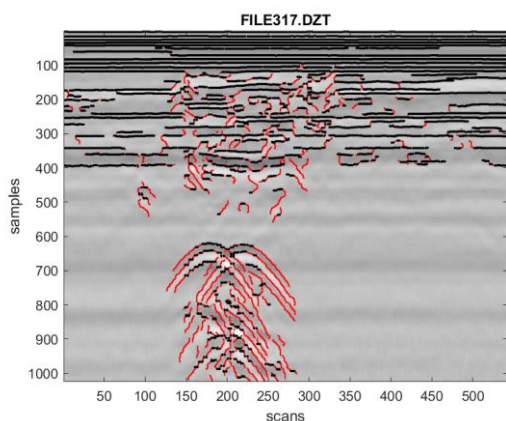


Елим. ивичних пиксела: 29.64 [%]
Време процесирања: 0.028 [s]

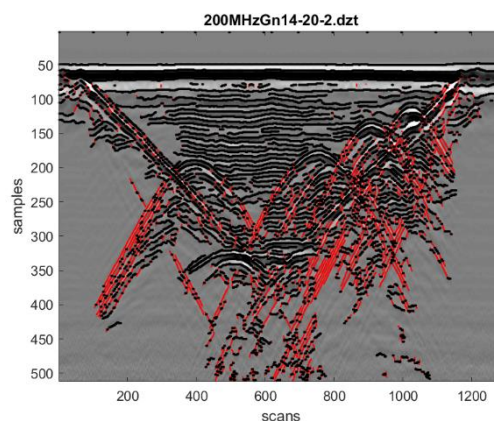


Елим. ивичних пиксела: 5.85 [%]
Време процесирања: 0.062 [s]

Маска Д

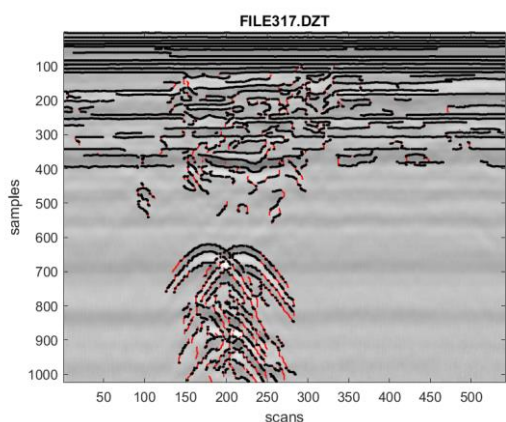


Елим. ивичних пиксела: 45.15 [%]
Време процесирања: 0.028 [s]

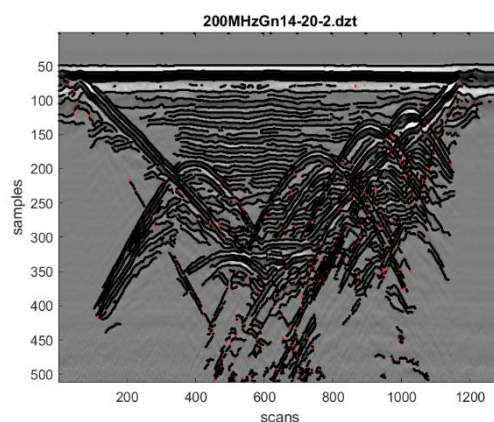


Елим. ивичних пиксела: 39.02 [%]
Време процесирања: 0.067 [s]

Маска Е

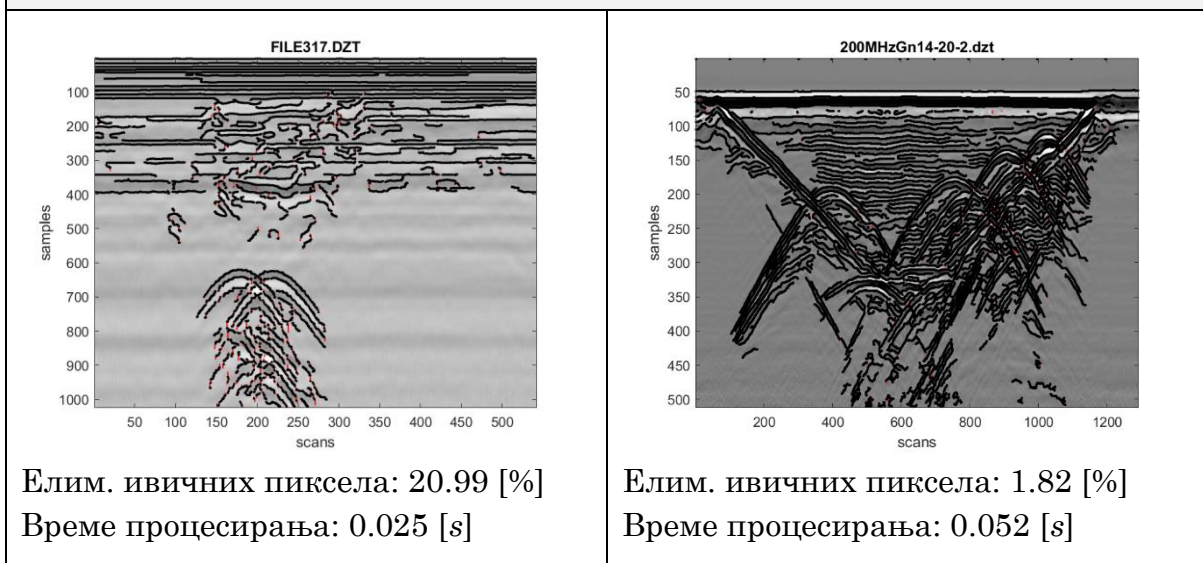


Елим. ивичних пиксела: 28.4 [%]
Време процесирања: 0.026 [s]



Елим. ивичних пиксела: 5.54 [%]
Време процесирања: 0.060 [s]

Маска Ф



За проналазак оптималне маске извршена је њихова анализа над 25 тест примера, како синтетичких тако и реалних радарграма. Међу анализираним тест примерима, поред једноставнијих, налазе се и сложени радарграми са већим утицајем шума и комплексним садржајем. На Графику 5.6. приказани су резултати елиминације ивичних пиксела (у процентима) за сваку маску и за сваки тест пример.



График 5.6 Процент елиминације ивичних пиксела применом различитих маски

На основу приказаних резултата јасно се уочава да је највећи проценат елиминације за анализирани радарграме постигнут са Маскама Б и Д, и то у

просеку 22.80% и 21.20%, респективно. Са друге стране, најмањи проценат елиминације добијен је применом Маске Ф у просеку 3.01%. Применом Маски А, Ц и Е добијен је сличан проценат елиминације ивичних пиксела. Ове маске имају 4-5 пута мањи постотак елиминације ивичних пиксела у односу на Маске Б и Д.

Поред процента елиминације ивичних пиксела за сваку предложену маску анализирано је и време процесирања. Време процесирања је мерено над истим тест примерима а резултати су приказани на Графику 5.7. Информација о времену значајна је првенствено због развоја алгорита који треба да врши процесирање радарграма у блиско реалном времену.

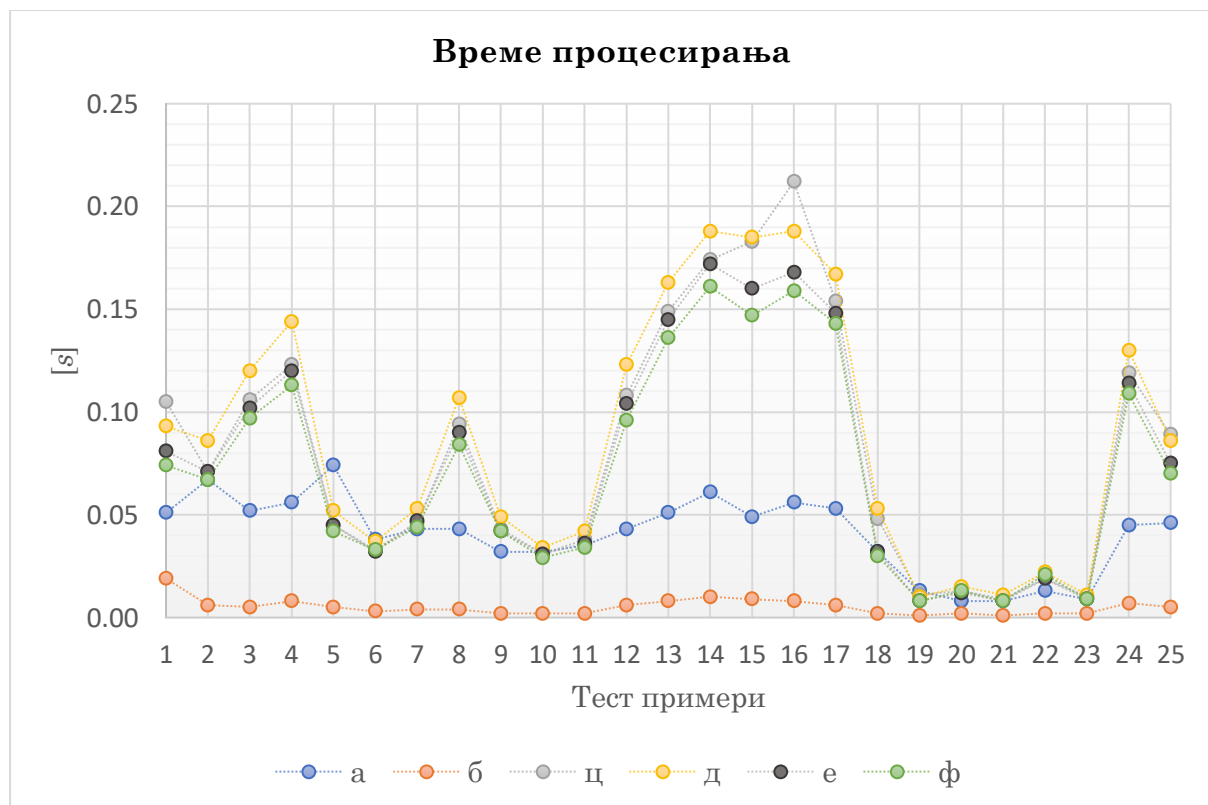
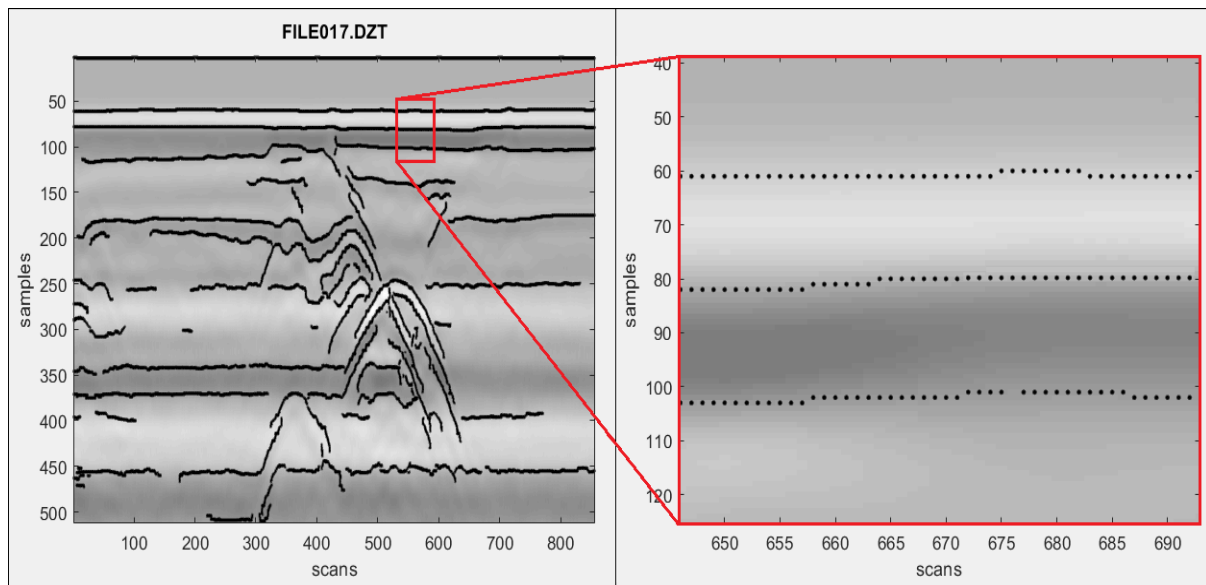


График 5.7 Време процесирања за примену различитих маски

На основу табеларног и графичког приказа времена процесирања по свакој дефинисаној маски долази се до закључка да се најмањи временски ресурси утроше применом Маске Б. Маска Б је најмање осетљива на повећање броја ивичних пиксела. Просечно време процесирања за ову маску износи 0.005s, док је максимално време процесирања 0.019s. Уједначено време процесирања ове маске над свим радарграмима потврђује да је она најмање осетљива на повећан број ивичних пиксела за анализу. Маска Д према процентуалној елиминацији ивичних пиксела има сличне резултате као Маска Б, али са друге стране она спада у Маске са највећим утрошком временских ресурса (График 5.7). Просечно време процесирања код свих других маски значајно је веће у односу на Маску Б.

5.3.2.3 ФАЗА 3: Елиминација хоризонталних слојева

Применом *Canny* детектора, у радарграму се региструју и ивични пиксели који се налазе на граничним слојевима земљишта. Ови пиксели се надовезују један на други образујући на тај начин приближно хоризонталне слојеве у радарграму (Слика 5.17, десно). Применом маски из претходне фазе алгоритма не долази до њихове елиминације.



Слика 5.17 Ивични пиксели настали од приближно хоризонталних слојева у радарграму

Са Сlike 5.17 уочава се и да ивични пиксели настали као први одбитак ЕМ таласа од површине земљишта формирају приближно хоризонтални слој у радарграму. Стварна геометрија наведених слојева добила би се у фази процесирања, попут: вертикалне нормализације радарграма, миграције и слично. Ови кораци се не узимају у обзир јер је основни задатак предложених алгоритама базиран на процесирању сирових података (са минималним поступком процесирања). Препознавање ивичних пиксела насталих од приближно хоризонталних слојева земљишта може се третирати у два различита правца [159]:

1. Детекција хоризонталних слојева земљишта у радарграму
 - У овом случају потребно је задржати ове ивичне пикселе у циљу даље екстракције информација о слојевима земљишта у радарграму.
2. Детекција хиперболичних рефлексија у радарграму
 - Ивични пиксели настали од хоризонталних слојева се третирају као шум у радарграму и потребно их је елиминисати.

Како је примарни циљ ове дисертације препознавање хиперболичних рефлексија у радарграму то значи да је ивичне пикселе детектоване у виду хоризонталних слојева у радарграму потребно елиминисати. За успешну

реализацију овог задатка неопходно је одредити услов за њихово препознавање. У том циљу формира се субматрица димензија $3 \times n$ са текућим ивичним пикселом у центру ове зоне (Слика 5.17). Основни услов за препознавање ових ивичних пиксела огледа се у следећем:

- Анализира се број ивичних пиксела у издвојеној зони. Уколико је та сума већа од задатог критеријума тај пиксел се елиминише, и он се сматра ивичним пикселом који је саставни део хоризонталног слоја у радарграму.

За успешну имплементацију овог корака извршена је детаљна анализа препознавања ивичних пиксела у радарграму, која обухвата два основна критеријума:

1. Дужина субматрице изражена у броју колона и
2. Процент ивичних пиксела унутар анализиране зоне издвојене субматрице.

Први критеријум подразумева промену величине субматрице по питању броја колона субматрице. Тестирање овог критеријума извршено је са варијацијама од 21, 41, 61, 81 и 101 колоне. То значи да за вредност од 21 колона текући пиксел анализира по 10 колона са обе његове стране, за 41 по 20 колона, за 61 по 30, за 81 по 40 и за 101 по 50 колона са обе стране ивичног пиксела. С обзиром да је број врста фиксиран на по једну врсту изнад и једну врсту испод текућег ивичног пиксела образују се субматрице димензија: 3×21 , 3×41 , 3×61 , 3×81 и 3×101 . Код броја врста не треба занемарити број одбирака по једном *scan*-у, јер ће се за исти радарграм са већим бројем одбирака добити хоризонтални слој који обухвата више врста са ивичним пикселима [14]. У оквиру издвојених субматрица испитује се други критеријум.

Други критеријум подразумева проналазак оптималног процента ивичних пиксела унутар издвојене зоне субматрице. За правилно одређивање овог критеријума узима се чињеница да резултат *Scan*у детектора у зонама граничних слојева земљишта најчешће подразумева по један пиксел у свакој колони. То значи да без обзира на обухват једног пиксела изнад и испод врсте текућег ивичног пиксела треба посматрати број пиксела по колонама издвојене субматрице. За тестирање овог критеријума врши се сума свих ивичних пиксела унутар издвојене субматрице, на основу које је потребно усвојити граничну вредност броја ивичних пиксела. Усвајање оптималног критеријума извршено је на основу 25%, 50%, 75% и 100% ивичних пиксела од укупног броја колона издвојене субматрице. Анализа овог критеријума извршена је над 25 реалних радарграма.

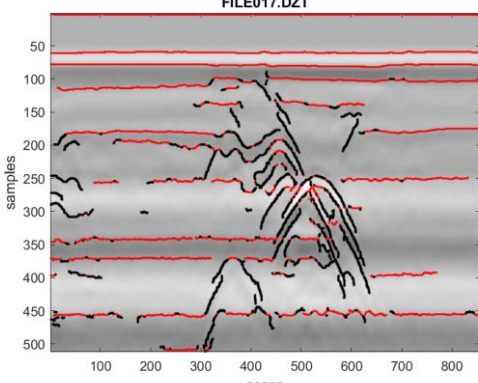
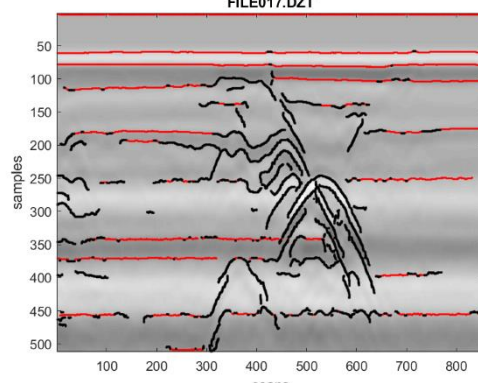
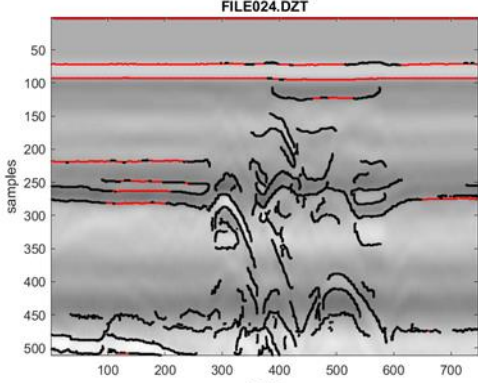
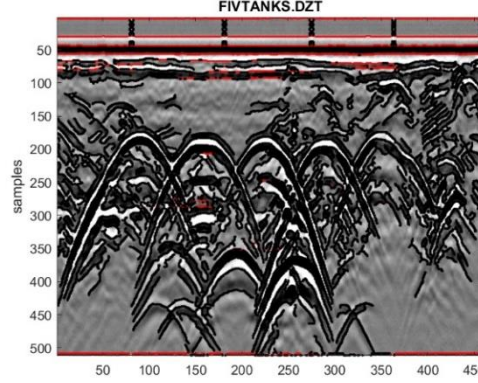
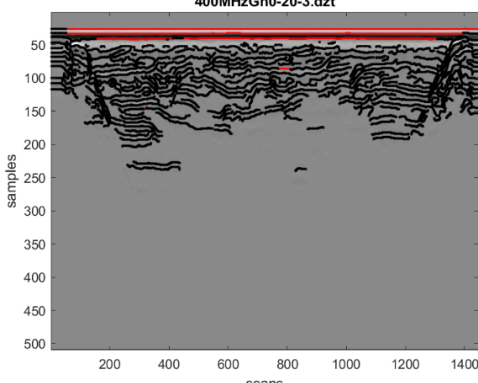
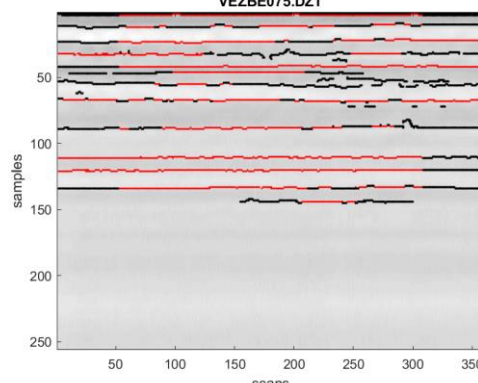
Табела 5.8 Тест подаци за препознавање хоризонталних слојева у радарграму

<i>Тест пример</i>	<i>scan/ m</i>	<i>Одбирака /scan</i>	<i>Број пиксела</i>	<i>Број ивичних пиксела</i>	<i>Range [ns]</i>	<i>Fa [MHz]</i>
#1	1235	512	632320	46302	110	200
#2	1310	512	668100	30667	70	400
#3	1447	512	737970	24408	70	400
#4	1198	512	610980	31030	70	400
#5	1321	512	673710	22952	70	400
#6	1316	512	671160	25963	70	400
#7	2497	512	1278464	26632	16	900
#8	588	512	301056	6758	25	400
#9	856	512	438272	10985	30	400
#10	748	512	382976	8967	25	400
#11	692	512	354304	9573	31	900
#12	396	512	202752	7001	35	200
#13	542	1024	555008	19705	20	900
#14	461	512	236032	27015	60	400
#15	348	512	178176	9006	75	200
#16	572	512	292864	24348	56	400
#17	504	512	258048	5458	13	900
#18	360	256	92160	4503	16	900
#19	428	512	219136	5429	16	900
#20	416	256	106496	6500	15	900
#21	408	256	104448	6184	15	900
#22	832	256	212992	13724	15	900
#23	736	256	188416	9895	15	900
#24	456	256	116736	6904	15	900
#25	2344	256	600064	37287	15	900
Просек	880		404506	17088		

Тест подаци се разликују по неколико параметара: броју *scan*-ова по метру, броју одбирака по једном *scan*-у, броју битова по одбирку, домету у *ns* као и централној фреквенцији антене (Табела 5.8).

У наставку дисертације (Табела 5.9) приказани су неки од резултата препознавања хоризонталних слојева у радарграму. Ивични пиксели добијени применом *Canpy* детектора приказани су црном бојом, док су црвеном бојом представљени пиксели који испуњавају услов за хоризонталне слојеве у радарграму са одговарајућим процентом и димензијом субматрице.

Табела 5.9 Резултати препознавања хоризонталних слојева у радарграму

<p style="text-align: center;">Тест пример: #9</p>  <p>Димензије субматрице: 3x51 Процент ивичних пиксела: 25%</p>	<p style="text-align: center;">Тест пример: #9</p>  <p>Димензије субматрице: 3x51 Процент ивичних пиксела: 50%</p>
<p style="text-align: center;">Тест пример: #10</p>  <p>Димензије субматрице: 3x51 Процент ивичних пиксела: 75%</p>	<p style="text-align: center;">Тест пример: #14</p>  <p>Димензије субматрице: 3x51 Процент ивичних пиксела: 75%</p>
<p style="text-align: center;">Тест пример: #3</p>  <p>Димензије субматрице: 3x51 Процент ивичних пиксела: 100%</p>	<p style="text-align: center;">Тест пример: #18</p>  <p>Димензије субматрице: 3x51 Процент ивичних пиксела: 100%</p>

Резултати елиминације ивичних пиксела у зависности од димензија и њиховог процентуалног садржаја унутар анализираних субматрица приказани су на Графицима 5.8 - 5.11.

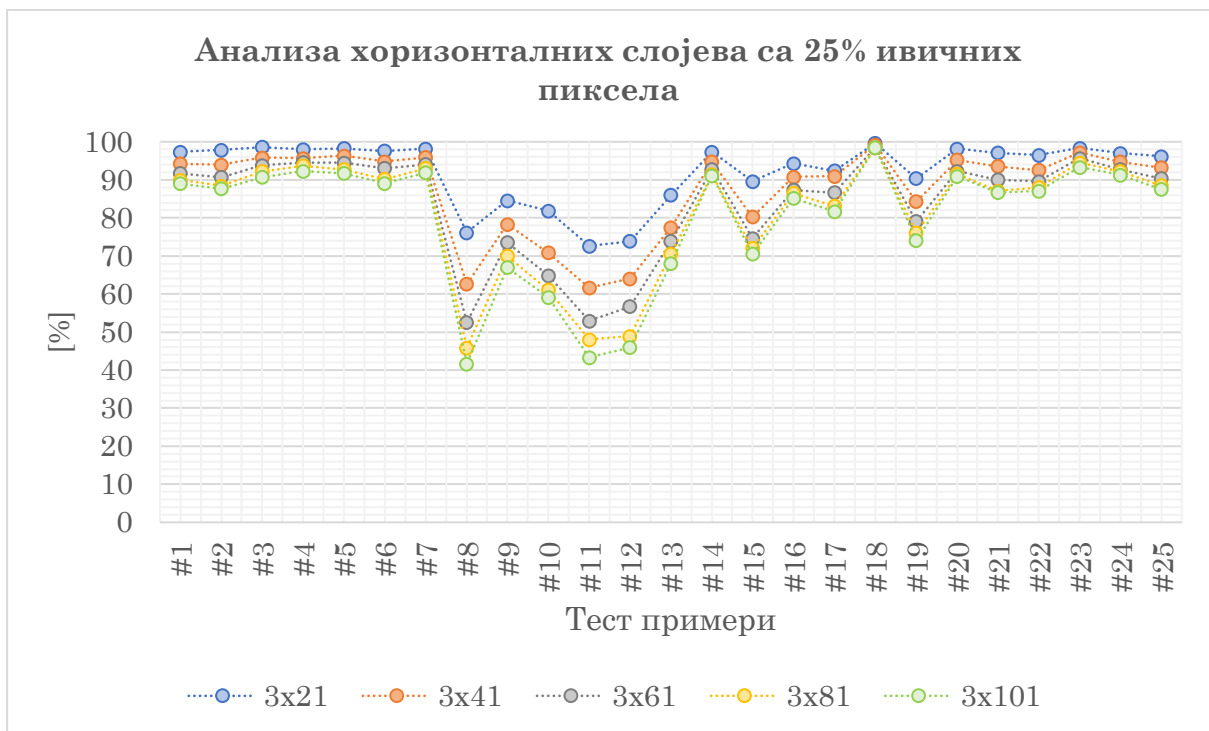


График 5.8 Елиминација ивичних пиксела у радарграму са 25% ивичних пиксела унутар субматрице 3×n

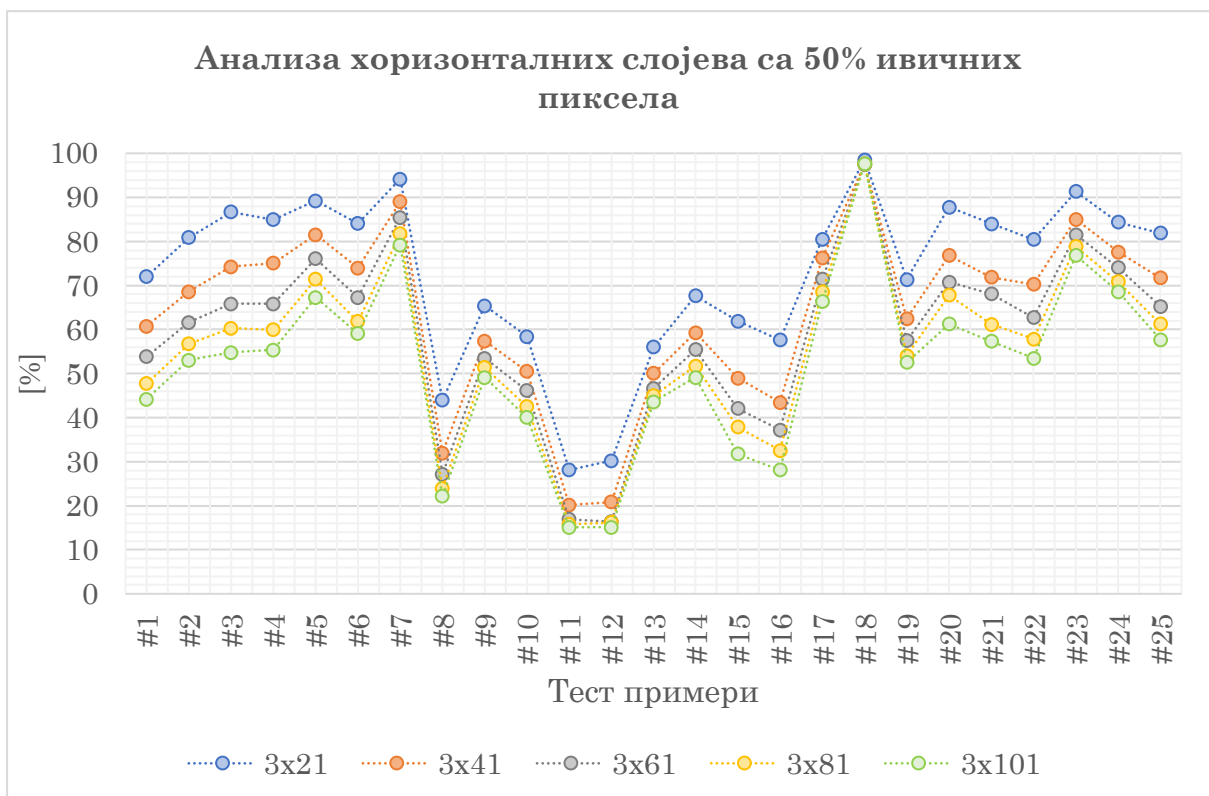


График 5.9 Елиминација ивичних пиксела у радарграму са 50% ивичних пиксела унутар субматрице 3×n

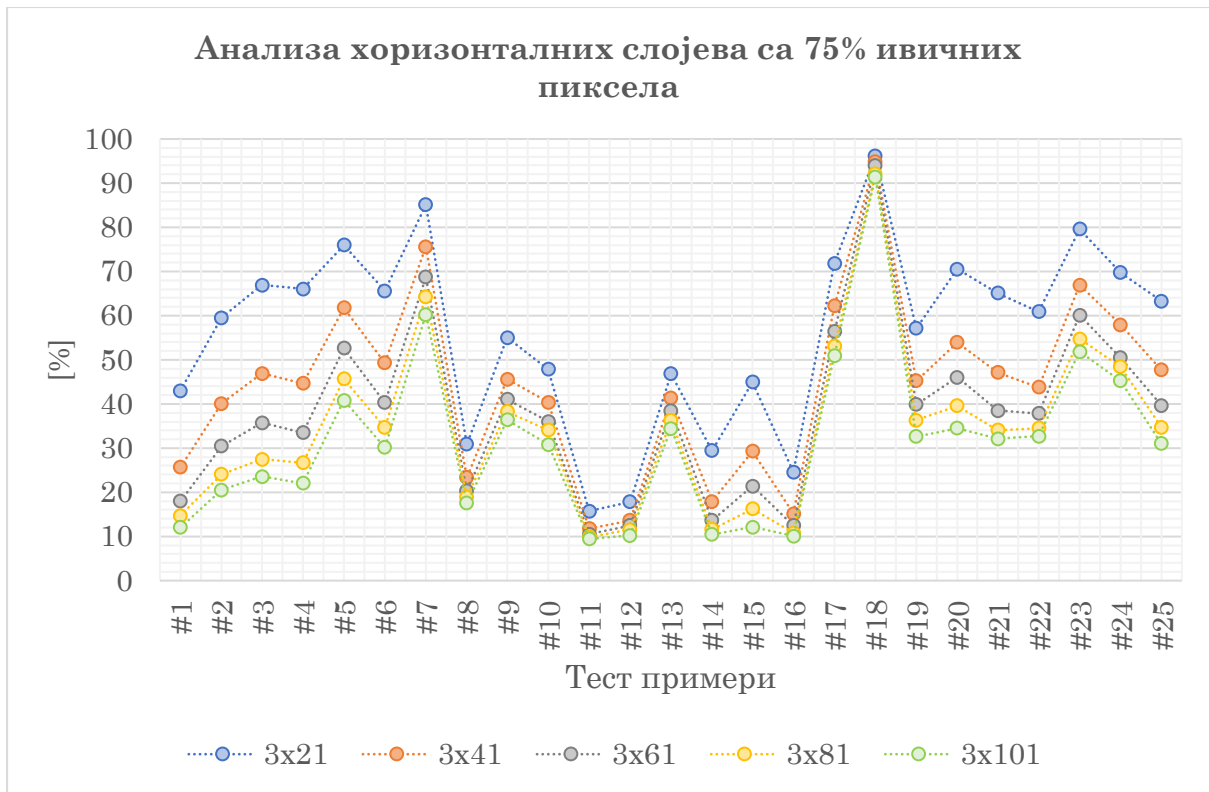


График 5.10 Елиминација ивичних пиксела у радарграму са 75% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$

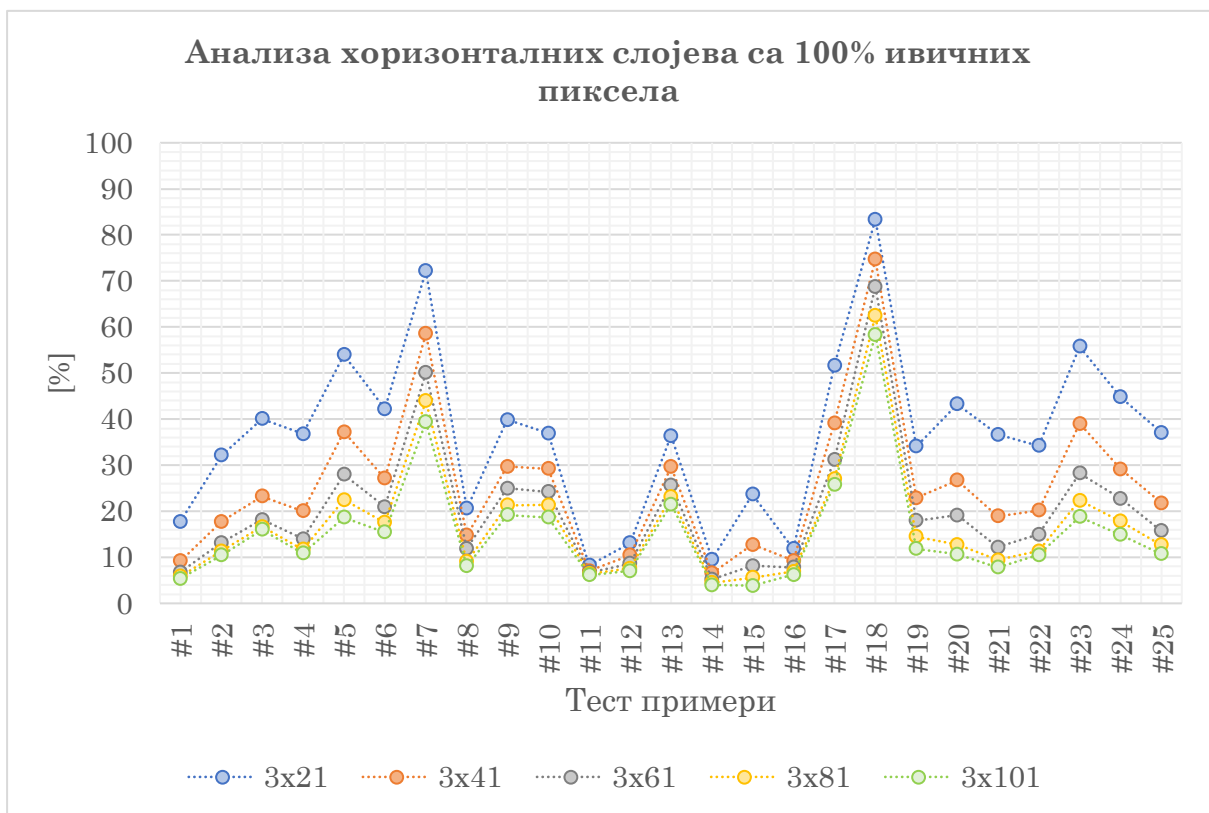


График 5.11 Елиминација ивичних пиксела у радарграму са 100% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$

За претходну анализу, на Графицима 5.12 - 5.15 је приказано и време процесирања сваког од анализираних услова.

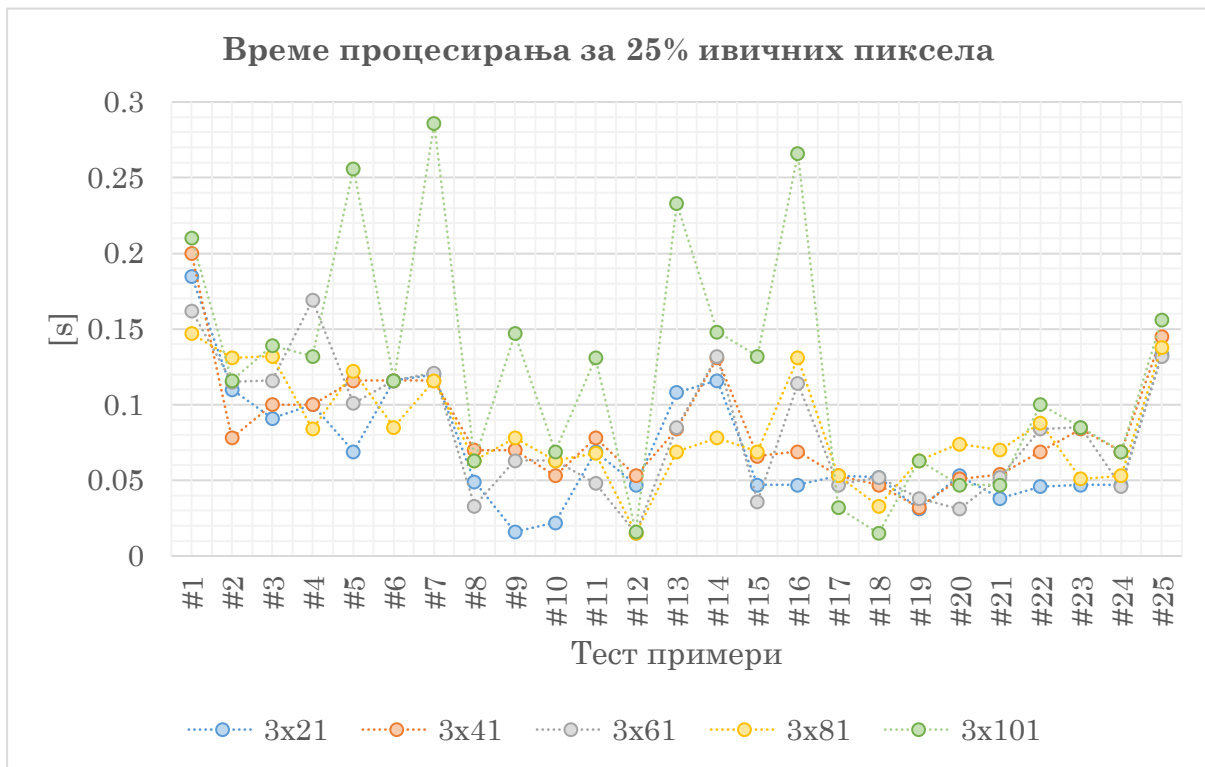


График 5.12 Време процесирања за 25% ивичних пиксела унутар субматрице 3xп

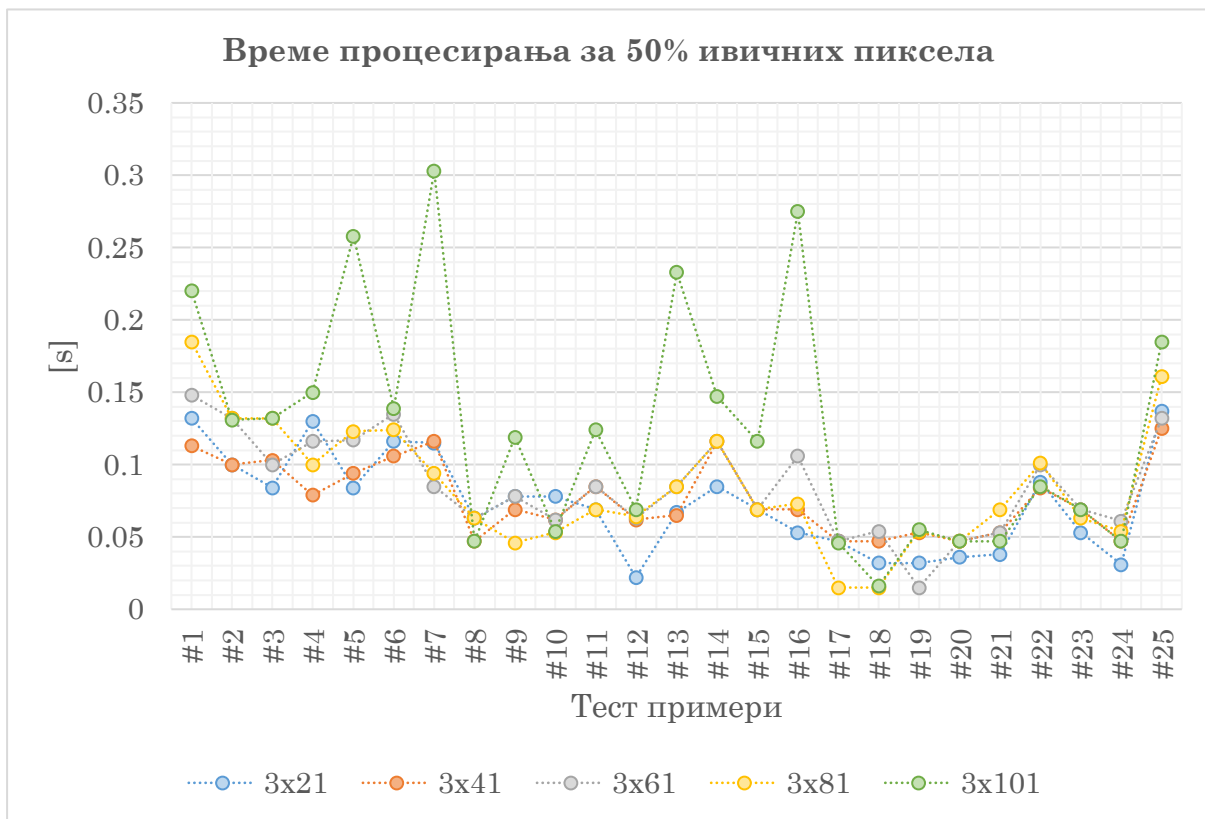


График 5.13 Време процесирања за 50% ивичних пиксела унутар субматрице 3xп

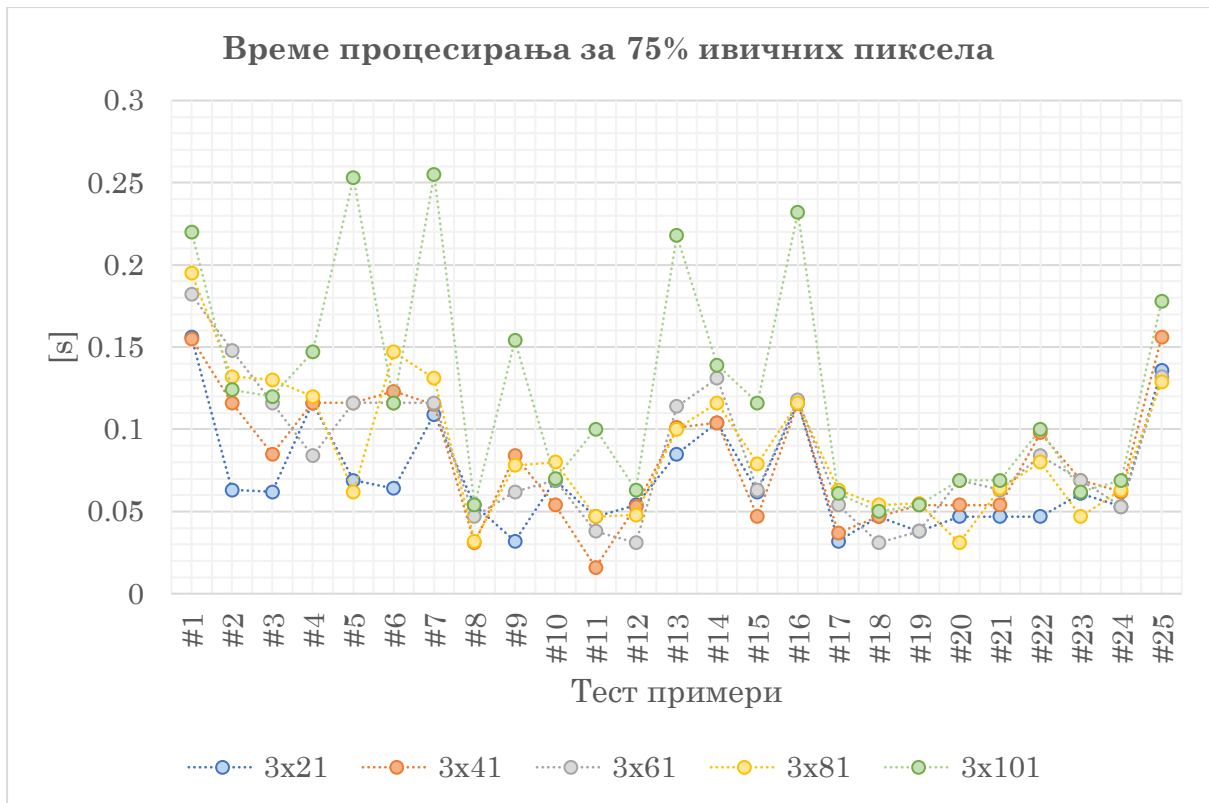


График 5.14 Време процесирања за 75% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$

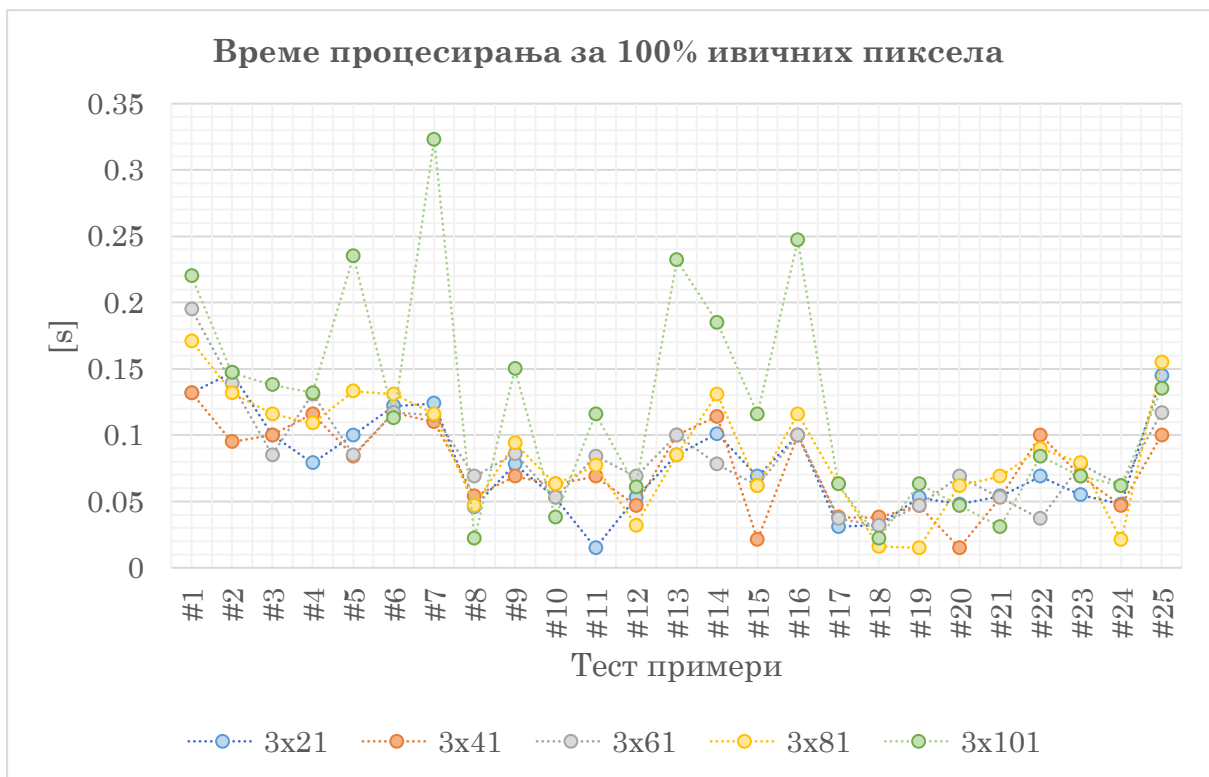


График 5.15 Време процесирања за 100% ивичних пиксела унутар субматрице $3 \times n$

На основу добијених резултата, и приказаних графикана долази се до следећих закључака:

- Процент елиминације ивичних пиксела зависи од улазних података и броја приближно хоризонталних слојева који се налазе у радарграму.
- Површински слој земљишта (по коме се креће антена) препознаје се у свим тест примерима као хоризонтални слој, без обзира на димензије субматрице.
- Промена димензије субматрице у значајној мери утиче на број ивичних пиксела који се усвајају за хоризонтални слој у радарграму.
- Најлошији резултати препознавања хоризонталних слојева добијају се са малим димензијама субматрице (нпр. 3x21) и малим процентом ивичних пиксела у посматраној субматрици.
- Повећање димензија субматрице побољшава детекцију хоризонталних слојева у радарграму, али са друге стране повећава време процесирања.
- Разлика у времену процесирања за димензије субматрице у распону од 3x21 до 3x81 је занемарљиво мала.
- Значајније повећање времена процесирања настаје код субматрице димензија 3x101.
- Процесирање свих радарграма (без обзира на број ивичних пиксела) извршава се у блиско реалном времену.

Када се узме у обзир проценат елиминације ивичних пиксела, димензије субматрице и време процесирања долази се до оптималних вредности анализираних критеријума, и то:

- Оптималне димензије субматрице су 3x81.
- Оптимална вредност процентуалног садржаја ивичних пиксела у анализираној субматрици је 75%.

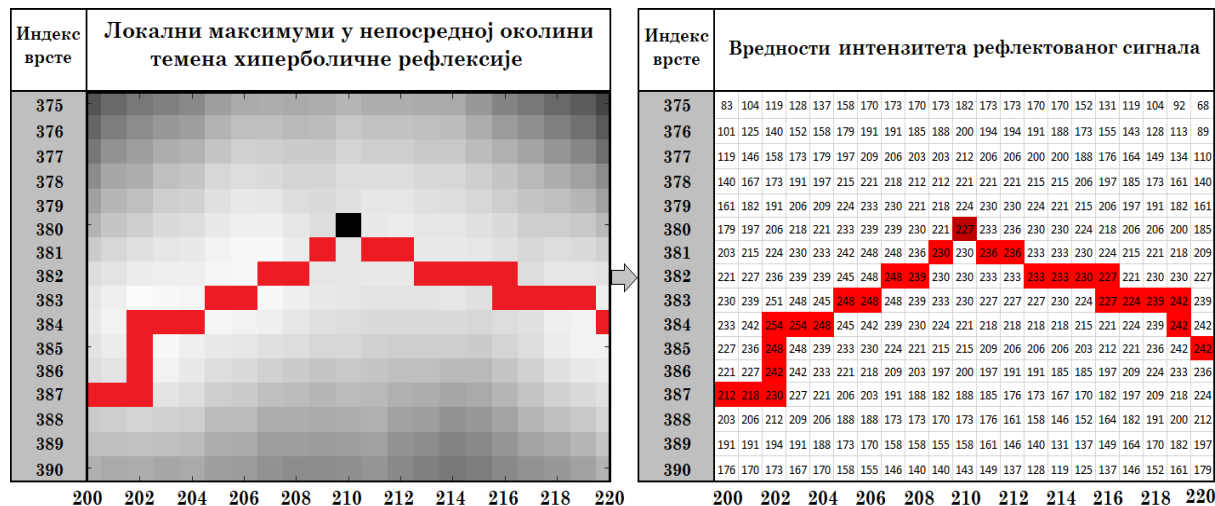
5.3.2.4 ФАЗА 4: Елиминација опадајуће врсте

Као што је наведено у Поглављу 4.3 врсте у радарграму представљају одбирке а колоне *scan*-ове. Повећањем дубине у радарграму повећава се и индекс врсте (одбирака) (Слика 5.18). Полазећи од ове чињенице и посматрајући пикселе у непосредној околини темена долази се до следећег закључка:

- Претрагом локалних максимума са субматрицом димензија 3x2 (Поглавље 5.3.1.4) за ивичне пикселе у околини темена хиперболичних рефлексија ови локални максимуми задржавају се у истој врсти (индекс врсте се не мења) или се постепено померају низ краке хиперболичних рефлексија (индекс врсте се повећава) (Слика 5.18).

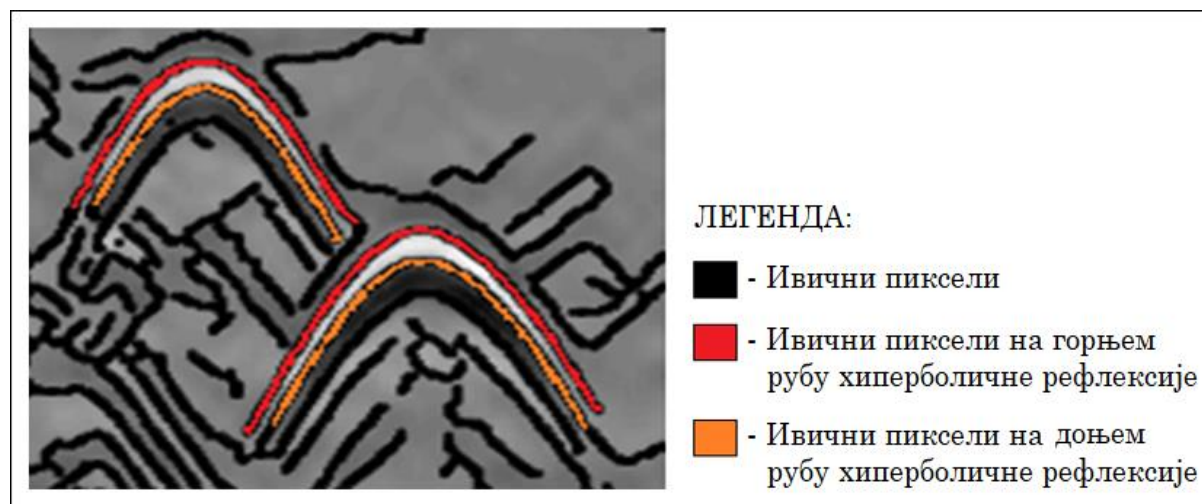
На основу претходног закључка, претрага локалних максимума може се искористити за додатну сегментацију ивичних пиксела који теоријски не могу

бити ивични пиксели у непосредној околини темена хиперболичних рефлексија. Кључна примена овог корака огледа се у елиминацији ивичних пиксела код којих се врста локалних максимума помера на горе (индекс врсте се смањује).



Слика 5.18 Исечак радарграма са ивичним пикселем у непосредној околини темена хиперболичне рефлексије (лево) и вредностима интензитета рефлектованог сигнала (десно)

Анализирајући ивичне пикселе који се налазе у непосредној околини темена хиперболичне рефлексије претрага локалних максимума се понаша приближно симетрично како на леву тако и на десну страну. У зависности од тога да ли се ивични пиксел налази на доњем или горњем рубу хиперболичне рефлексије (Слика 5.19) долази до различитог правца претраге локалних максимума.



Слика 5.19 Ивични пиксели на доњем и горњем рубу хиперболичне рефлексије

Код пиксела на доњем рубу хиперболичне рефлексије, у првим итерацијама претраге локалних максимума индекс врсте креће да опада, све док не дође до средине рефлектованог сигнала хиперболичне рефлексије, када долази до

постепеног повећања индекса врста (Слика 5.20, наранџасти пиксели). Код ивичних пиксела на горњем рубу то није случај. За њих на самом почетку претраге долази до постепеног повећања индекса врста локалних максимума (Слика 5.20, црвени пиксели) које се наставља спуштајући се низ краке хиперболичне рефлексije (Слика 5.20, сиви пиксели).

Индекс врсте	Вредности интензитета рефлектованог сигнала																				
375	83	104	119	128	137	158	170	173	170	173	182	173	173	170	170	152	131	119	104	92	68
376	101	125	140	152	158	179	191	191	185	188	200	194	194	191	188	173	155	143	128	113	89
377	119	146	158	173	179	197	209	206	203	203	212	206	206	200	200	188	176	164	149	134	110
378	140	167	173	191	197	215	221	218	212	212	221	221	221	215	215	206	197	185	173	161	140
379	161	182	191	206	209	224	233	230	221	218	224	230	230	224	221	215	206	197	191	182	161
380	179	197	206	218	221	233	239	239	230	221	227	233	236	230	230	224	218	206	206	200	185
381	203	215	224	230	233	242	248	248	236	230	230	236	236	233	233	230	224	215	221	218	209
382	221	227	236	239	239	245	248	248	239	230	230	233	233	233	233	230	227	221	230	230	227
383	230	239	251	248	245	248	248	248	239	233	230	227	227	227	230	224	227	224	239	242	239
384	233	242	254	254	248	245	242	239	230	224	221	218	218	218	215	221	224	239	242	242	242
385	227	236	248	248	239	233	230	224	221	215	215	209	206	206	206	203	212	221	236	242	242
386	221	227	242	242	233	221	218	209	203	197	200	197	191	191	185	185	197	209	224	233	236
387	212	218	230	227	221	206	203	191	188	182	188	185	176	173	167	170	182	197	209	218	224
388	203	206	212	209	206	188	188	173	173	170	173	176	161	158	146	152	164	182	191	200	212
389	191	191	194	191	188	173	170	158	158	155	158	161	146	140	131	137	149	164	170	182	197
390	176	170	173	167	170	158	155	146	140	140	143	149	137	128	119	125	137	146	152	161	179

<p> - Почетни ивични пиксел са горњег и доњег руба</p> <p> - Први локални максимуми за ивични пиксел са горњег руба</p>	<p> - Први локални максимуми за ивични пиксел са доњег руба</p> <p> - Заједнички локални максимуми за почетне пикселе са оба руба</p>
---	---

Слика 5.20 Пример претраге локалних максимума за почетне ивичне пикселе са доњег и горњег руба у непосредној околини темена хиперболичне рефлексije

Ако се посматра ивични пиксел који се налази на левом краку хиперболичне рефлексije и претрага локалних максимума је оријентисана на леву страну, наредни локални максимуми се проналазе у наставку крака (индекс врсте расте) (Слика 5.21, лево, зелени пиксели). Са друге стране анализирајући исти ивични пиксел али са субматрицом која врши претрагу на десну страну локални максимуми теже ка темену хиперболичне рефлексije (индекс врсте опада) (Слика 5.21, лево, плави пиксели).

Из наведеног примера закључује се да је за постизање најбољих резултата додатне сегментације ивичних пиксела претрагу локалних максимума неопходно извршити на обе стране.

Индекс врсте	Вредности интензитета рефлектованог сигнала																				
	375	83	104	119	128	137	158	170	173	170	173	182	173	173	170	170	152	131	119	104	92
376	101	125	140	152	158	179	191	191	185	188	200	194	194	191	188	173	155	143	128	113	89
377	119	146	158	173	179	197	209	206	203	203	212	206	206	200	200	188	176	164	149	134	110
378	140	167	173	191	197	215	221	218	212	212	221	221	221	215	215	206	197	185	173	161	140
379	161	182	191	206	209	224	233	230	221	218	224	230	230	224	221	215	206	197	191	182	161
380	179	197	206	218	221	233	239	239	230	221	227	233	236	230	230	224	218	206	206	200	185
381	203	215	224	230	233	242	248	248	236	230	230	236	236	233	233	230	224	215	221	218	209
382	221	227	236	239	239	245	248	248	239	230	230	233	233	233	233	230	227	221	230	230	227
383	230	239	251	248	245	248	248	248	239	233	230	227	227	227	230	224	227	224	239	242	239
384	233	242	254	254	248	245	242	239	230	224	221	218	218	218	218	215	221	224	239	242	242
385	227	236	248	248	239	233	230	224	221	215	215	209	206	206	206	203	212	221	236	242	242
386	221	227	242	242	233	221	218	209	203	197	200	197	191	191	185	185	197	209	224	233	236
387	212	218	230	227	221	206	203	191	188	182	188	185	176	173	167	170	182	197	209	218	224
388	203	206	212	209	206	188	188	173	173	170	173	176	161	158	146	152	164	182	191	200	212
389	191	191	194	191	188	173	170	158	158	155	158	161	146	140	131	137	149	164	170	182	197
390	176	170	173	167	170	158	155	146	140	140	143	149	137	128	119	125	137	146	152	161	179

	- Почетни ивични пиксел са десног крака хиперболичне рефлексије		- Претрага локалних максимума на леву страну
	- Почетни ивични пиксел са левог крака хиперболичне рефлексије		- Претрага локалних максимума на десну страну

Слика 5.21 Пример претраге локалних максимума на леву и десну страну за почетне пикселе на крацима хиперболичне рефлексије

Кроз ову фазу потребно је одредити толеранцију по питању броја опадајућих врста претраге локалних максимума. Поред броја опадајућих врста одређује се и оптималан број итерација за њихову претрагу. Ако кроз задате итерације индекс врсте локалних максимума пређе граничну вредност тај пиксел се елиминише. У циљу проналаска оптималних вредности наведених параметара извршена је анализа са променљивим параметрима који су приказани у Табели 5.10.

Табела 5.10 Анализирани параметри за одређивање оптималних вредности броја итерација претраге локалних максимума и броја врста са опадајућим индексом

Огр. 1: Опадајућа врста	Огр. 2: Број итерација за проналасак локалних максимума			
1	5	10	15	20
2	5	10	15	20
3	5	10	15	20

Тестирање ових параметара извршено је над 25 радарграма. У наставку дисертације приказани су резултати у виду графикана за претрагу на леву страну. Због симетричности крака и претрага на десну страну даје сличне резултате, те стога није приказана.

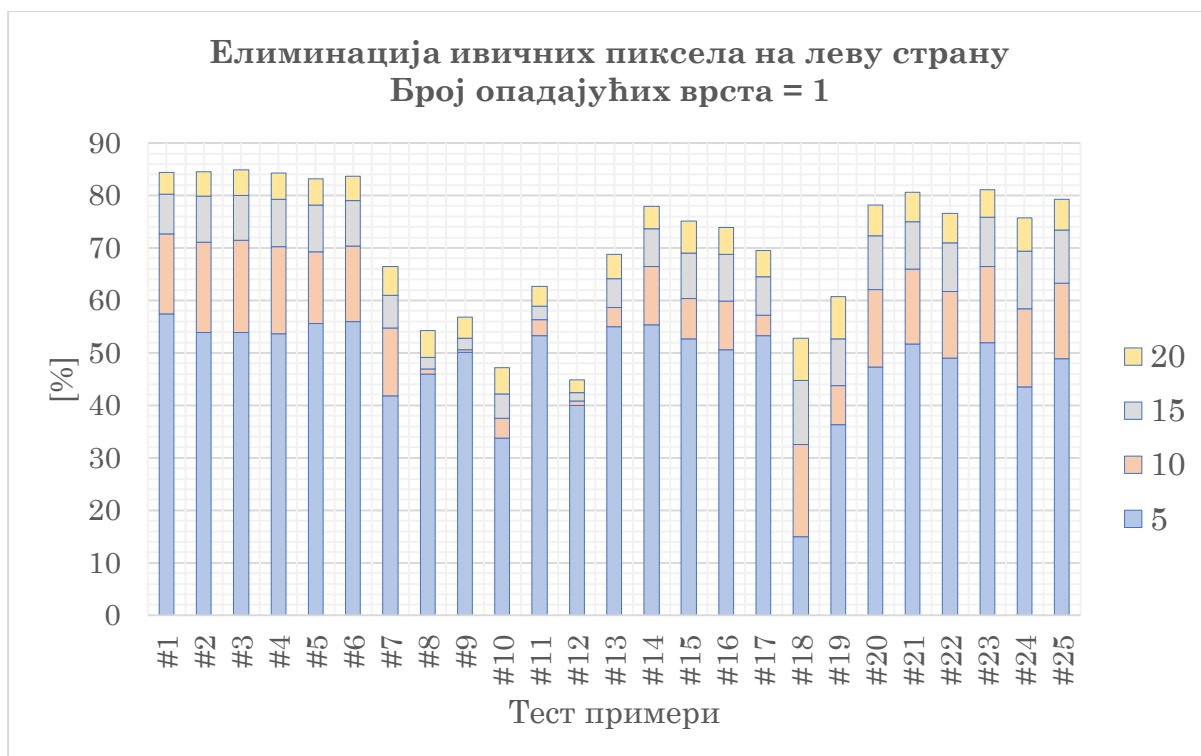


График 5.16 Процент елиминације ивичних пиксела на леву страну, са опадајућим индексом једне врсте, за различит број итерација локалних максимума (5 - 20)

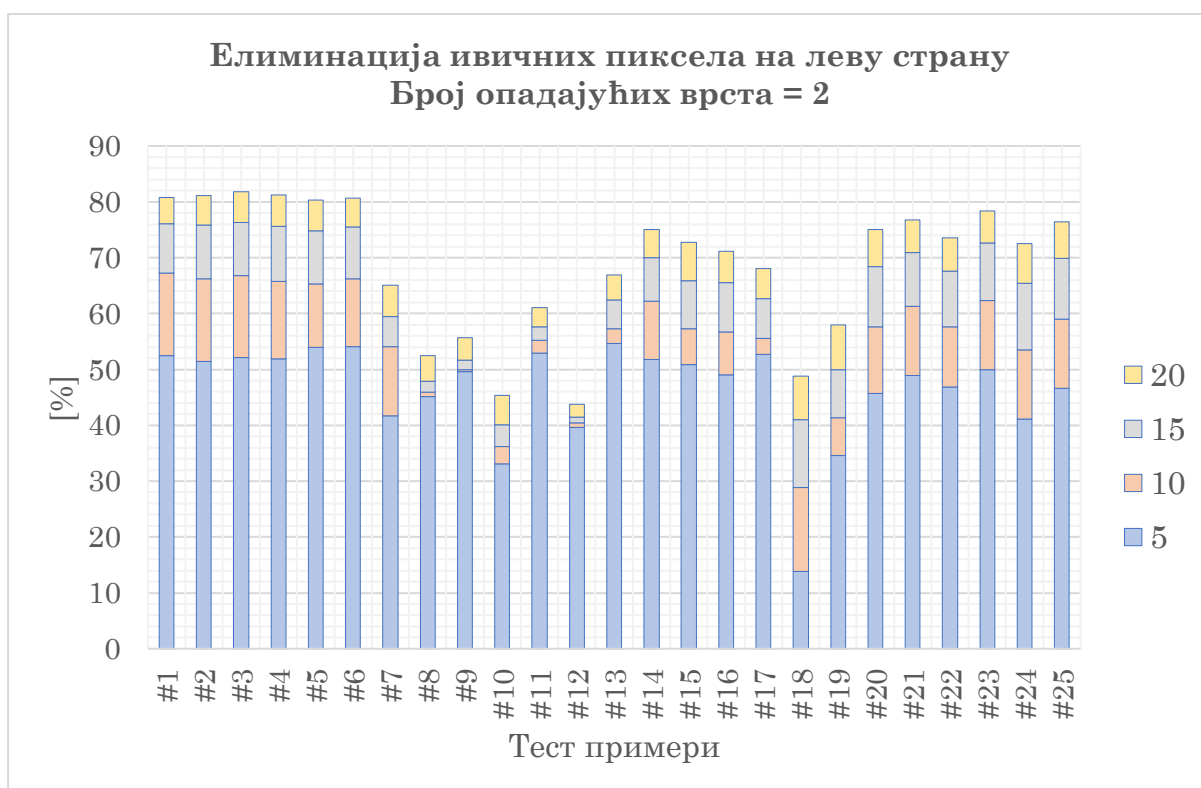


График 5.17 Процент елиминације ивичних пиксела на леву страну, са опадајућим индексом од две врсте, за различит број итерација локалних максимума (5 - 20)

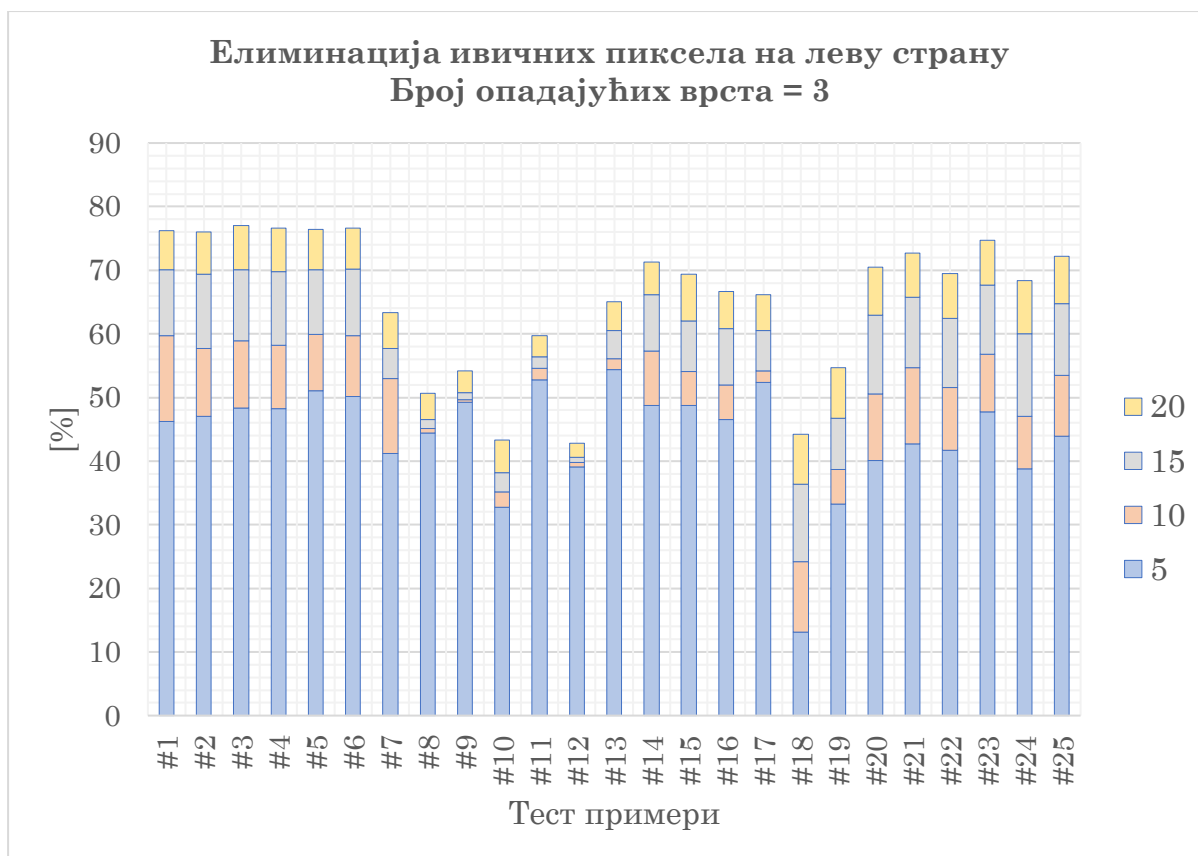


График 5.18 Процент елиминације ивичних пиксела на леву страну, са опадајућим индексом од три врсте, за различит број итерација локалних максимума (5 - 20)

На основу приказаних графика са процентом елиминације ивичних пиксела са опадајућим индексом врсте уочава се следеће:

- Повећањем броја опадајућих врста смањује се проценат елиминације ивичних пиксела.
- Релативне разлике између процената елиминације ивичних пиксела добијене са различитим бројем претраге локалних максимума најизраженије су код 10 и 15 итерација претраге.
- Са 20 итерација не постижу се значајна побољшања процентуалне елиминације ивичних пиксела у односу на 15 итерација.
- Максималан проценат елиминације ивичних пиксела у овој фази не значи и оптимално решење, јер треба задржати ивичне пикселе у непосредној околини темена хиперболичних рефлексја. Са друге стране минималан број елиминације ивичних пиксела у већини случајева елиминише сувише мали број ивичних пиксела.

У циљу одабира оптималног решења граничних вредности извршена је и анализа временских ресурса. Анализа времена процесирања на десну страну за једну опадајућу врсту приказана је на Графику 5.19.

Исти број итерација се анализира за сваки ивични пиксел (5, 10, 15 и 20), стога није неопходно приказивати време обраде за случај две или три опадајуће врсте. Такође, време процесирања је слично на обе стране, јер је идентичан начин претраге локалних максимума, само је супротан правац претраге.

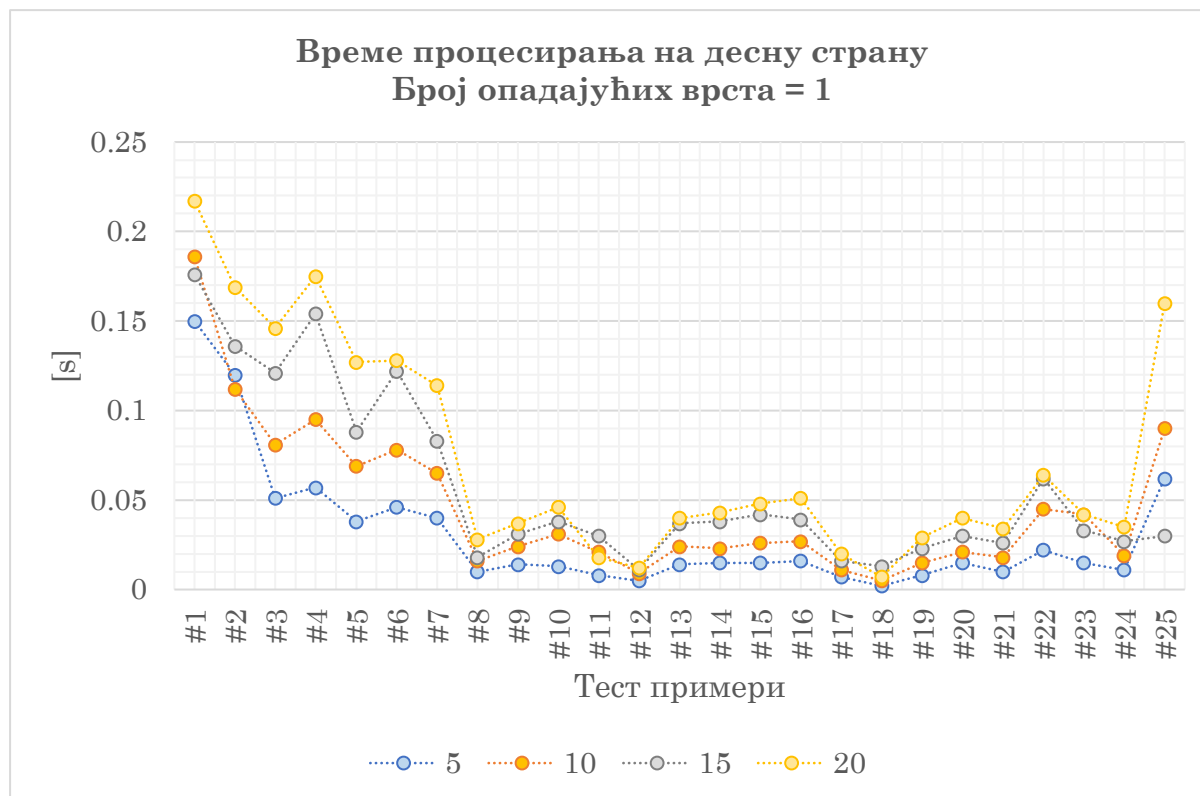


График 5.19 Време процесирања ивичних пиксела на десну страну, са опадајућим индексом једне врсте, за различит број итерација локалних максимума (5 - 20)

На основу графика који репрезентују време процесирања уочава се следеће:

- За радарграме до 5m дужине (тест примери #8 до #24) просечно време процесирања је до 0.05 секунди. За ове радарграме број анализираних итерација има занемарљив утицај на време процесирања.
- Код свих тест примера време процесирања је мање од 0.2 секунде осим за тест пример #1, где досеже максималну вредност од 0.22s.
- Са графикона се уочава да је тренд пораста или смањења времена сличан за све тест примере.
- Повећање броја претраге локалних максимума у директној је пропорцији са временом процесирања. Само на ретким местима овај услов није испуњен, али се то приписује врло малом времену процесирања.

На основу извршене анализе долази се до закључка да су оптималне вредности анализираних параметара следеће:

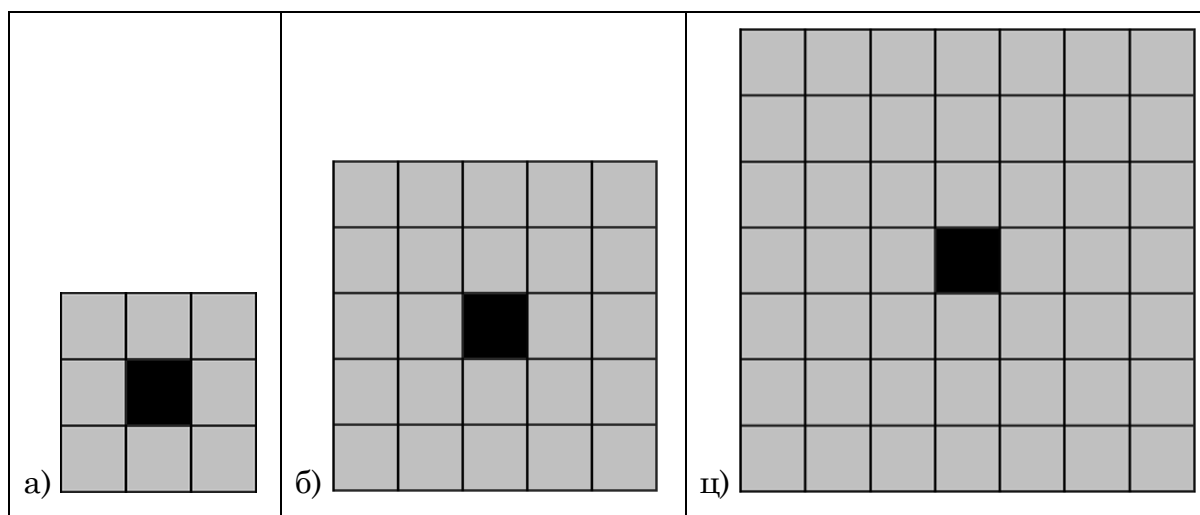
- број опадајућих врста = 2,
- број итерација = 15.

5.3.2.5 ФАЗА 5: Елиминација изолованих пиксела

На основу резултата из претходних фаза алгоритма повећава се број изолованих пиксела. Под изолованим пикселима у овом случају третирају се сви ивични пиксели који у свом непосредном окружењу немају ниједан други ивични пиксел. Анализом ових пиксела долази се до закључка да то нису ивични пиксели у непосредној околини темена хиперболичних рефлексива и да се могу елиминисати. За њихово препознавање и елиминацију тестиране су субматрице различитих димензија (Слика 5.22):

- субматрица димензија 3×3
- субматрица димензија 5×5
- субматрица димензија 7×7

Црни пиксел на Слици 5.22 представља ивични пиксел који се анализира, док сиви пиксели дефинишу зону претраге. Услов који се проверава јесте да ли је сума ове субматрице једнака јединици. Уколико је овај услов испуњен анализирани ивични пиксел се брише (на његово место се поставља нула), јер то значи да постоји само један ивични пиксел у издвојеној зони (ивични пиксел који се анализира).

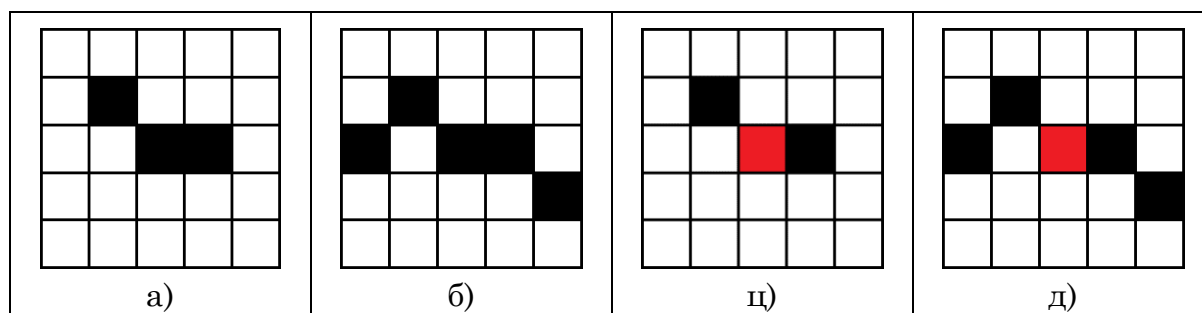


Слика 5.22 Зона претраге за изоловане пикселе

Најстрожи критеријум који је анализиран дефинисан је зоном претраге димензија 3×3 . За ову субматрицу уочено је да у неким радарграмима може доћи до елиминације свих ивичних пиксела из непосредне околине темена хиперболичне рефлексиве. Стога су тестирани блажи критеријуми са димензијама субматрица 5×5 и 7×7 . Након тестирања наведених субматрица закључено је да димензија 7×7 представља сувише благ критеријум, те је за финалне димензије усвојена субматрица димензија 5×5 .

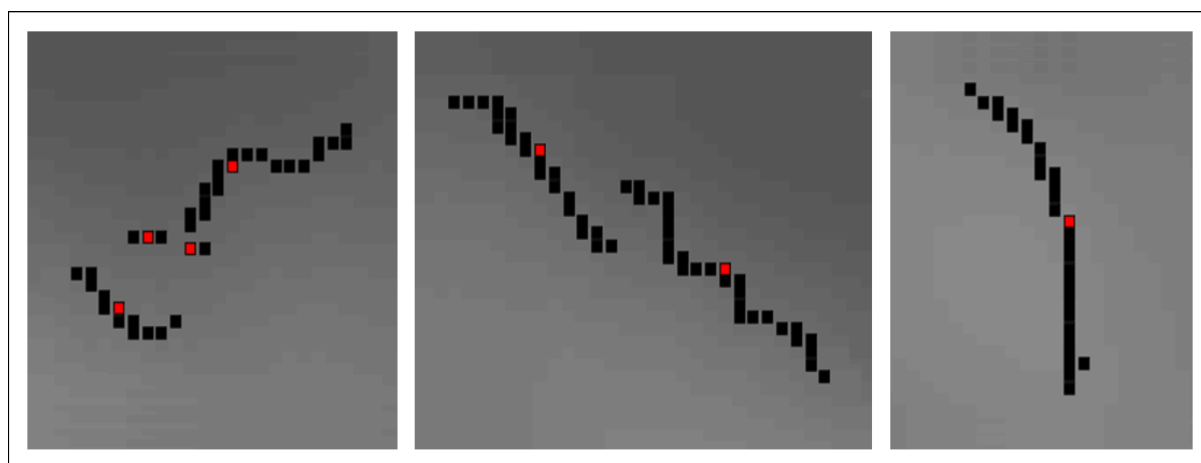
5.3.2.6 ФАЗА 6: Груписање ивичних пиксела

Ова фаза има за циљ да груписањем пиксела изврши додатну редукцију ивичних пиксела. За имплементацију ове фазе неопходно је да алгоритам препозна који ивични пиксели формирају групу. Под групом се подразумевају два или више ивичних пиксела који се међусобно додирују у било ком од могућих суседних осам праваца. На Слици 5.23 приказане су неке од група (Слика 5.23а, Слика 5.23б) као и репрезенти тих група у виду црвених пиксела (Слика 5.23ц, Слика 5.23д).



Слика 5.23 Групе пиксела са три (а) и пет ивичних пиксела (б) и пиксели који их репрезентују (ц, д, црвени пиксели)

Пиксели који чине групу замењују се једним карактеристичним ивичним пикселом (Слика 5.24, црвени пиксели). На Слици 5.24 приказан је резултат груписања ивичних пиксела на неколико издвојених сегмената радарграма. Због бољег уочавања рада алгоритма у овој фази приказани резултат добијен је након примене *Canny* детектора ивица.



Слика 5.24 Резултат груписања ивичних пиксела

5.3.2.7 Резиме

ФАЗА 1. Прва фаза предложеног алгоритма (Слика 5.13) подразумева примену *Canny* детектора ивичних пиксела над целокупним радарграмом. У наредним фазама алгоритма врши се додатна сегментација са пажљиво одабраним критеријумима који на брз и ефикасан начин врше додатну

елиминацију ивичних пиксела. У овом случају неки од критеријума могу бити променљиви у зависности од параметара радарграма како би се постигли најбољи резултати сегментације, за разлику од првог алгоритма где је овакав приступ теже изводљив.

ФАЗА 2. На основу добијених резултата уочава се да се Маскама Б и Д постижу најбољи резултати елиминације ивичних пиксела. Најбољи резултати на глобалном нивоу постигнути су са применом Маске Б. Додатни параметар који фаворизује ову маску је време процесирања које је значајно мање у односу на све остале маске. Такође, Маска Б је најмање осетљива на повећање броја ивичних пиксела, те се на основу извршених анализа она усваја као оптималан услов по питању процента елиминације ивичних пиксела ове фазе алгоритма. Генерални закључак је да се једноставнијом маском постижу бољи резултати, док се комплекснијим маскама губи на општости њихове примене.

ФАЗА 3. Ова фаза значајна је из више разлога. Детекција хоризонталних слојевана радарграму може се посматрати као крајњи резултат алгоритма или као пиксели које је потребно елиминисати. У овом случају врши се елиминација ивичних пиксела који су детектовани као хоризонтални слојеви у радарграму. У том циљу усвојена је оптимална димензија субматрице за претрагу од 3×81 као и проценат ивичних пиксела унутар анализираних субматрице (75%). Ова фаза се извршава у блиско реалном времену, нарочито за стандардне дужине радарграма код детекције цеви и каблова (до 5m).

ФАЗА 4. Кроз ову фазу се поред ивичних пиксела који се налазе на доњем рубу хиперболичне рефлексije уклањају и ивични пиксели настали под утицајем различитих шума садржаних у радарграму. Процесирање се врши у блиско реалном времену. За стандардне дужине радарграма до 5m време процесирања је 0.05s.

ФАЗА 5. Ова фаза у најмањој мери врши редукцију ивичних пиксела али је значајна за наредну фазу алгоритма, с обзиром да би се они анализирали као специјалан вид групе сачињен од једног пиксела.

ФАЗА 6. Пиксели који нису елиминисани у претходним фазама најчешће формирају мање групе пиксела који се међусобно додирују. Кроз ову фазу врши се редукција тих група тако што се усваја по један пиксел који репрезентује посматрану групу.

Применом наведених фаза у значајној мери врши се редукција полазне групе ивичних пиксела (преко 99%) у блиско реалном времену. Усвајање темена хиперболичне рефлексije код овог алгоритма извршава се након издвајања сета координата тачака на крацима хиперболичне рефлексije, што је анализирано у наставку дисертације.

5.4 Издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексција

Одређивање координата тачака које репрезентују темена хиперболичних рефлексција врши се применом једног од претходно предложених алгоритама или њиховом комбинацијом. У наредном кораку неопходно је издвојити координате тачака на крацима хиперболичних рефлексција које их репрезентују. На основу издвојених координата тачака на крацима хиперболичних рефлексција могу се одредити радијус и брзина детектованог вода. Према најбољем сазнању аутора, тренутно не постоје алгоритми који се баве аутоматизованим поступком издвајања тачака на крацима хиперболичних рефлексција. Из тог разлога у оквиру ове фазе креиран је алгоритам за издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексција, а посебна пажња посвећена је одређивању критеријума заустављања. У општем смислу, екстракцију координата тачака на крацима хиперболичних рефлексција могуће је извршити на три начина:

1. Ручно
2. Полуаутоматски и
3. Аутоматски

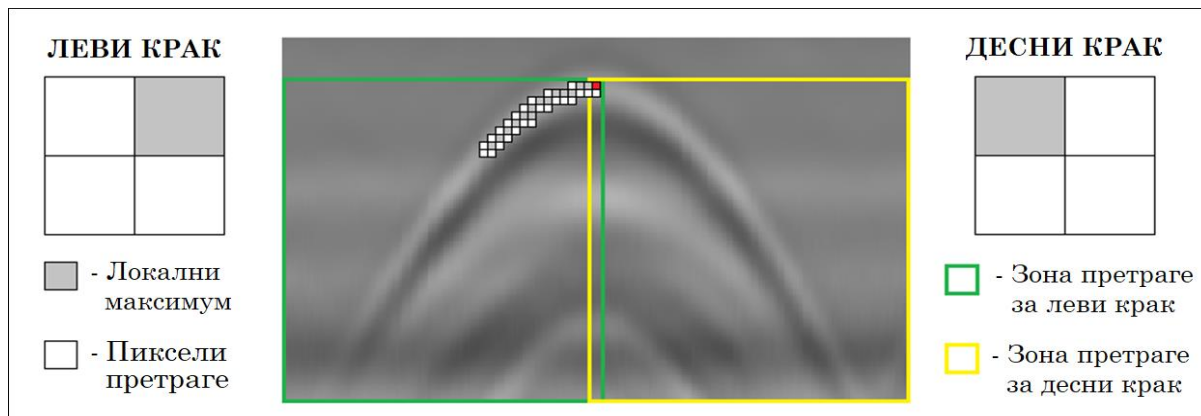
У овој дисертацији акценат је на поступку аутоматизоване екстракције координата тачака на крацима хиперболичних рефлексција. У наставку је предложен поступак за њихово одређивање са акцентом на дефинисање критеријума заустављања.

5.4.1 Основна претрага

Претрага координата тачака на крацима хиперболичних рефлексција започиње од координата темена хиперболичне рефлексције усвојених у претходном кораку алгоритма. Прво се на основу индекса колоне усвојеног темена врши подела радарграма на леву и десну страну. На овај начин у левој зони радарграма смештен је леви крак, а у десној десни крак хиперболичне рефлексције. Ова подела омогућује независну претрагу и независно генерисање координата тачака на левом и десном краку хиперболичне рефлексције.

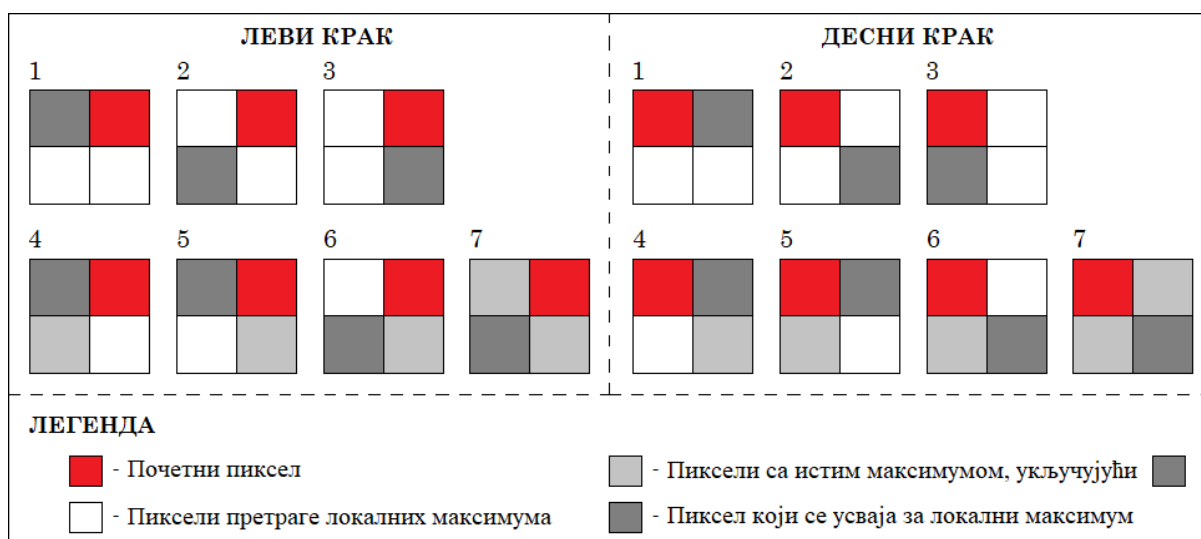
За одређивање координата тачака на левом краку хиперболичне рефлексције формира се субматрица димензија 2×2 . У првој итерацији претраге пиксел са координатама темена заузима позицију прве врсте, друге колоне посматране субматрице (Слика 5.25, црвени пиксел). На овај начин врши се позиционирање почетне локације субматрице, са које се издвајају подаци оригиналног радарграма. У оквиру издвојене субматрице са оригиналним подацима радарграма проналази се локални максимум од преосталих пиксела (први локални максимум). Након проналаска првог локалног максимума

субматрица се итеративно помера тако да текући локални максимум увек заузима позицију прве врсте и друге колоне текуће субматрице. Претрага координата тачака на десном краку је иста с тим што се текући локални максимум увек смешта у прву врсту и прву колону субматрице 2×2 (Слика 5.25, десни крак). Овакав начин претраге ограничава зону од интереса на трећи квадрант (математички координатни систем код кога координате темена дефинишу координатни почетак) у коме теоријски мора бити смештен леви крак хиперболичне рефлексije. Поред тога, спречава се прелазак претраге координата тачака на суседне краке хиперболичних рефлексija.



Слика 5.25 Зоне и начин претраге левог и десног крака хиперболичне рефлексije

У поступку претраге локалних максимума на претходно објашњен начин постоји седам могућих комбинација (Слика 5.26). У прве три комбинације ради се о јединственом локалном максимуму, док у наредна три постоје два по два пиксела са истом вредношћу која уједно представља локални максимум. Последњи случај подразумева исте вредности сва три пиксела претраге. На Слици 5.26 приказан је пиксел који се усваја као локални максимум у свакој комбинацији.



Слика 5.26 Шема усвајања локалних максимума у поступку претраге координата тачака на крацима хиперболичних рефлексija

5.4.2 Одређивање критеријума заустављања за издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексција

Претходно објашњен поступак издвајања тачака на крацима хиперболичних рефлексција итеративно се понавља спуштајући се постепено низ краке хиперболичних рефлексција. Како би генерисање ових тачака било коначно у овој фази алгорита дефинисан је критеријум заустављања. Основни услови које овај критеријум треба да задовољи су следећи:

- независан од димензија хиперболичне рефлексције и симетричности крака,
- независан у односу на целовитост геометрије хиперболичне рефлексције (зашумљеност и континуитет хиперболичне рефлексције),
- независан од дубине на којој се налази хиперболична рефлексција,
- применљив над различитим параметрима аквизиције радарграма.

У складу са наведеним условима за одређивање критеријума заустављања за издвајање тачака на крацима хиперболичних рефлексција извршено је неколико анализа. Све анализе могу се сврстати у једну од следеће три групе:

1. Анализа интензитета рефлектованог сигнала издвојених тачака на крацима,
2. Анализа непосредне околине издвојених тачака на крацима и
3. Анализа резидуала тачака на крацима хиперболичних рефлексција у односу на криву другог реда.

Наведене анализе детаљно су објашњене у наставку дисертације.

5.4.2.1 Анализа интензитета рефлектованог сигнала издвојених тачака на крацима хиперболичних рефлексција

Издајање координата тачака на крацима врши се на начин који је описан у претходном поглављу. У процесу издвајања ових тачака једна од најважнијих информација коју носи свака тачка јесте вредност интензитета рефлектованог сигнала. Стога је у наставку дисертације извршена детаљна анализа вредности интензитета рефлектованог сигнала за тачке на крацима хиперболичних рефлексција. Ова анализа важна је како би се стекао што бољи увид како и у којој мери промена основних параметара аквизиције утиче на вредност интензитета рефлектованог сигнала. На основу добијених резултата може се донети закључак који од параметара аквизиције не утиче на вредност рефлектованог сигнала, који је доминантан и каква је природа њиховог понашања за исти број издвојених тачака на крацима хиперболичних рефлексција. Такође, на основу ове анализе потребно је закључити да ли је утицај вредности интензитета рефлектованог сигнала могуће предвидети тј. да ли се на основу улазних параметара аквизиције он може искористити као једина информација за дефинисање критеријума заустављања за генерисање тачака на крацима хиперболичних рефлексција.

Анализа интензитета рефлектованог сигнала издвојених тачака на крацима хиперболичних рефлексија извршена је над синтетичким подацима како би се добиле информације без утицаја шума. У том циљу извршено је генерисање 60 синтетичких радарграма који садрже по једну хиперболичну рефлексију. Експеримент подразумева фиксирање свих улазних параметара за генерисање синтетичких радарграма осим једног који се варира у дефинисаном опсегу вредности (нпр. промена радијуса објекта у опсегу 20-200m). У наставку дисертације извршена је детаљна анализа интензитета рефлектованог сигнала дуж крака хиперболичних рефлексија варирајући следеће параметре:

1. Фреквенција антене,
2. Домет (*range*),
3. Диелектрична константа околног земљишта,
4. Дубина објекта,
5. Радијус објекта и
6. Материјал објекта.

У Табели 5.11 приказане су вредности претходно наведених параметра скенирања.

Табела 5.11 Аквизициони параметри за анализу интензитета рефлект. сигнала

Проме- нљива	ДОМЕН		ПАРАМЕТРИ СКЕНИРАЊА				ОБЈЕКАТ		
	<i>x</i>	<i>y</i>	Побуда	Фрекв. [MHz]	Домет [ns]	ϵ_r	Дубина [m]	Пречник [m]	Мате- ријал
ФРЕКВЕНЦИЈА АНТЕНЕ	3	2	<i>ricker</i>	300	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	400	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	500	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	600	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	700	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	800	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	1000	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	1100	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	1200	20	6	0.3	0.10	Метал
ДОМЕТ	3	2	<i>ricker</i>	900	10	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	12	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	14	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	16	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	18	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	22	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	24	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	26	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	28	6	0.3	0.10	Метал

МАТЕРИЈАЛ ОКОЛНОГ ЗЕМЉИШТА	3	2	<i>ricker</i>	900	20	4	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	8	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	10	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	12	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	14	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	16	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	18	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	20	0.3	0.10	Метал
ДУБИНА ОБЈЕКТА	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.1	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.2	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.4	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.5	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.6	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.7	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.8	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.9	0.10	Метал
ПРЕЧНИК ОБЈЕКТА	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.02	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.04	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.06	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.08	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.12	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.14	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.16	Метал
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.18	Метал
МАТЕРИЈАЛ ОБЈЕКТА	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	4
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	6
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	8
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	10
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	12
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	14
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	16
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	18
	3	2	<i>ricker</i>	900	20	6	0.3	0.10	20

Резултати интензитета рефлектованог сигнала тачака на крацима хиперболичних рефлексија добијени на основу анализираних вредности приказане су у наставку.

5.4.2.1.1 Варирање фреквенције антене

Варирање фреквенције антене извршено је у опсегу од 300 до 1200 MHz. Фреквенција је итеративно повећавана за 100 MHz тако да је укупно анализирано 10 комбинација. Резултати интензитета рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичних рефлексција при варирању наведене фреквенције антене приказани су на Графику 5.20. С обзиром на симетричност крака хиперболичних рефлексција (без утицаја шума на синтетичким радарграмима) резултати интензитета рефлектованог сигнала су исти и за леви крак, те стога они неће бити приказани.

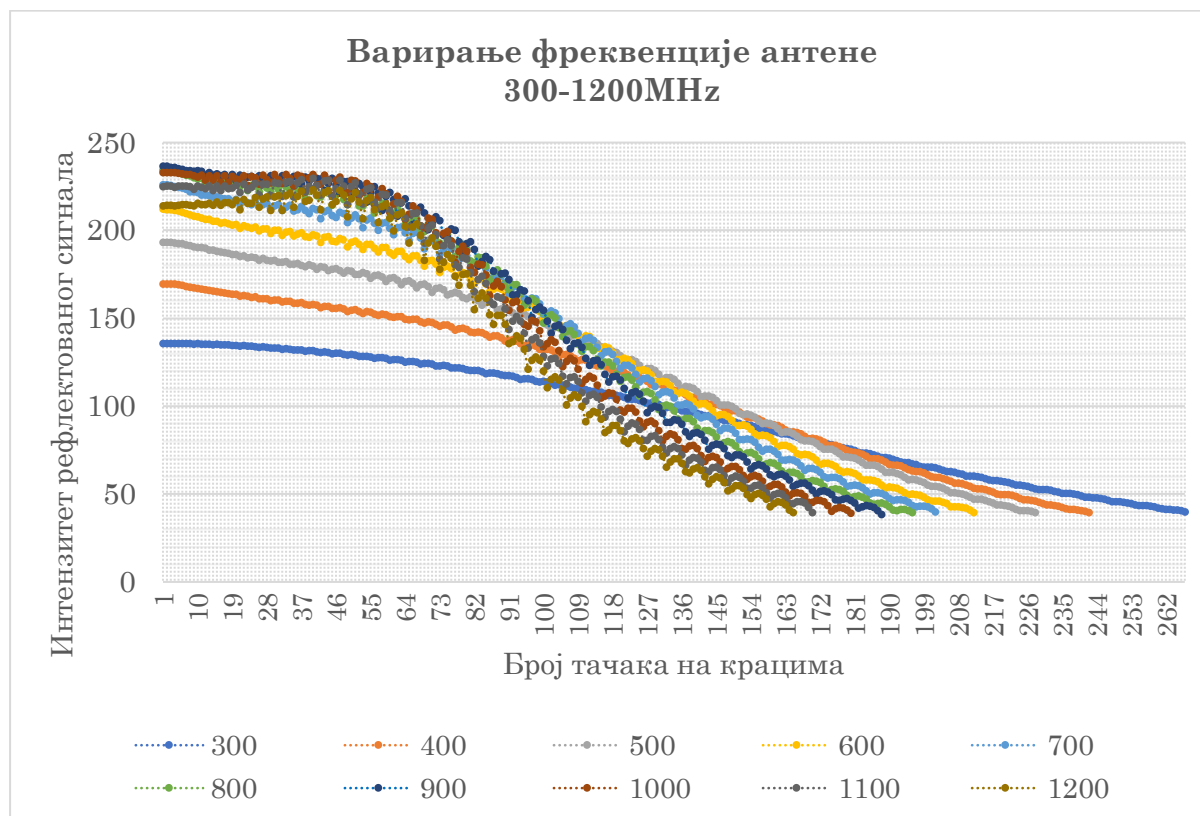


График 5.20 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексције при варирању фреквенције антене од 300-1200 MHz

Почетне вредности интензитета (код темена хиперболичних рефлексција) крећу се у распону од 130 до 240, док на крајевима крака износе ≈ 40 (за 8-битни формат записа радарграма). За антене централних фреквенција до 450 MHz интензитет рефлектованог сигнала приближно линеарно опада како се тачке генеришу низ краке хиперболичних рефлексција. Константан пад интензитета за сваку наредну тачку на крацима уочљив је за централне фреквенције антене до 700 MHz. За фреквенције антене преко 700 MHz интензитет рефлектованог сигнала у првих 50 издвојених тачака има мале осцилације, након чега његова вредност нагло опада. Са повећањем фреквенције антене овај пад је израженији. Мање разлике у интензитету рефлектованог сигнала уочавају се за фреквенције антене преко 700 MHz.

5.4.2.1.2 Варирање домета

Варирање домета извршено је у опсегу од $10-28ns$, са кораком од $2ns$. Овај опсег првенствено је изабран на основу фреквенције антене која је при овој анализи била фиксирана на $900MHz$. Такође приликом одабира опсега за анализу домета вођено је рачуна и да целокупан објекат од интереса буде обухваћен у целисти. Добијени резултати вредности интензитета рефлектованог сигнала приказни су на Графику 5.21.

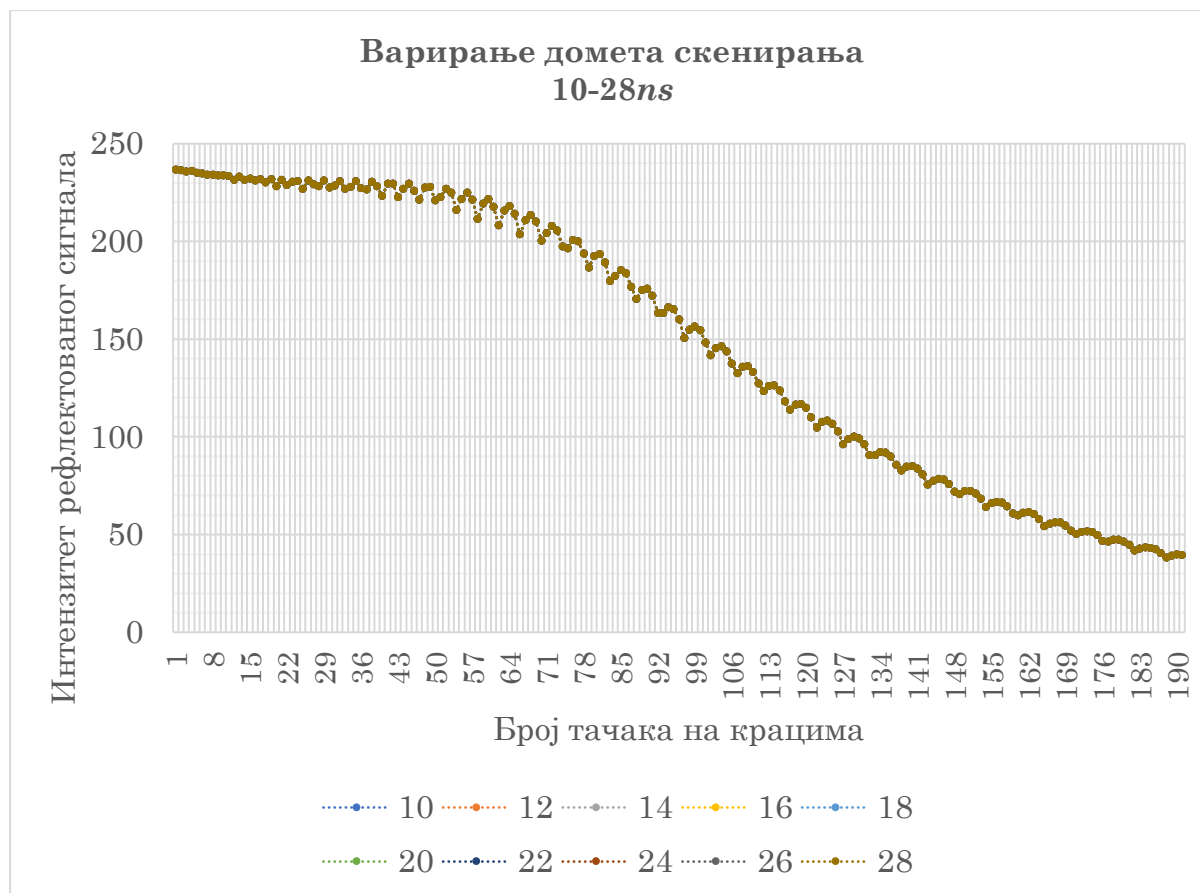


График 5.21 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању домета скенирања у опсегу од $10-28ns$

На основу добијених резултата уочено је да промена домета скенирања не утиче на интензитет рефлектованог сигнала тачака на крацима хиперболичне рефлексије. Ово је очекивано с обзиром да су сви остали параметри до објекта од интереса фиксирани попут материјала околног земљишта, фреквенције антене и слично. Такође, код синтетичких радарграма не долази до сабијања радарграма по дубини када се вредност домета смањује.

С обзиром да домет нема утицај на интензитет рефлектованог сигнала добијени резултат је идентичан за вредности које су добијене на Графику 5.20 код антене од $900MHz$.

5.4.2.1.3 Варирање диелектричне константе околног земљишта

Вредност диелектричне константе земљишта значајна је са становишта простирања ЕМ таласа. Из тог разлога у овом делу извршена је и анализа промене диелектричне константе околног земљишта у распону вредности од 4-20. Добијени резултати ове анализе приказани су на Графику 5.22.

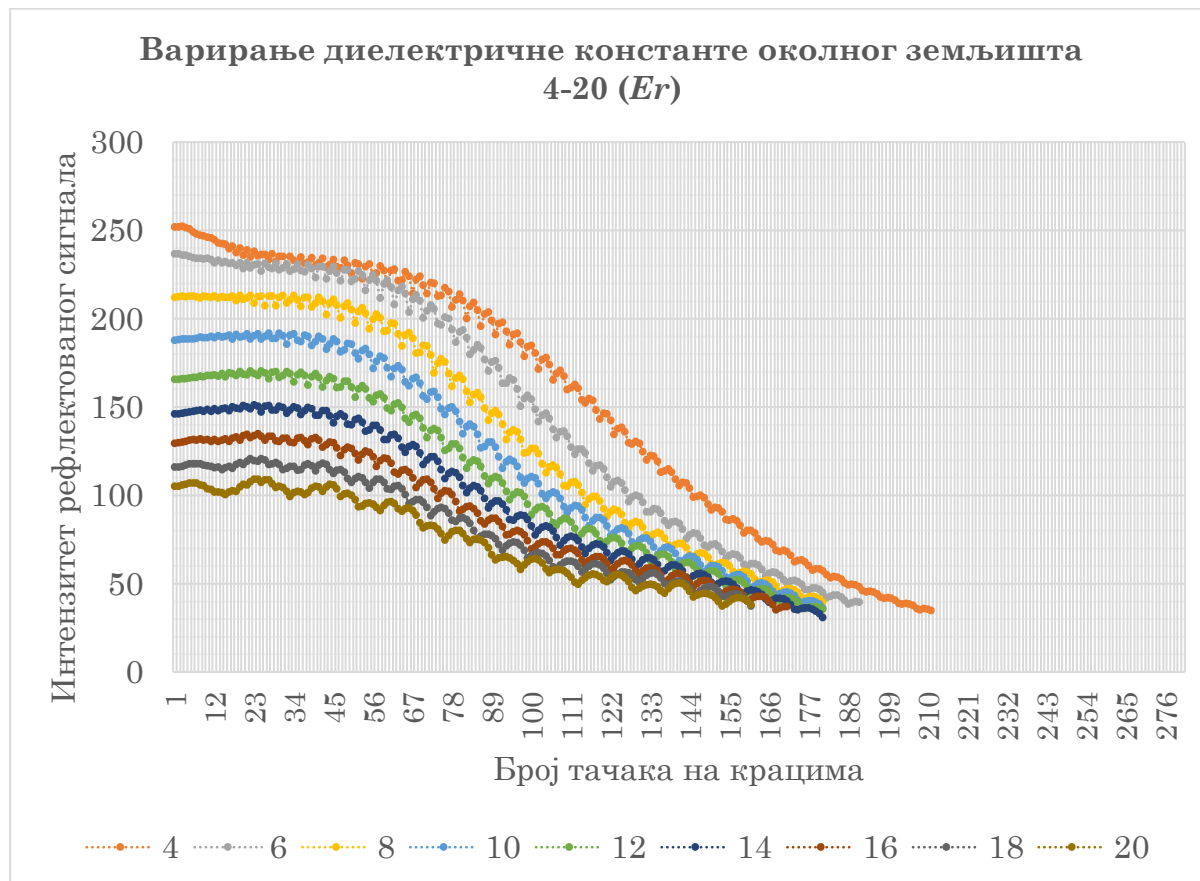


График 5.22 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању диелектричне константе околног земљишта у опсегу од 4-20 (E_r)

Почетне вредности интензитета рефлектованог сигнала крећу се у распону од 100 до 250, док на крајевима крака износе ≈ 30 (за 8-бит формат записа радарграма). На основу добијених резултата (График 5.22) уочено је да се повећањем E_r околног земљишта смањује вредност рефлектованог сигнала. Ово понашање је карактеристично у распону свих анализираних вредности диелектричне константе. За анализиране вредности диелектричних константи постоји уједначен тренд благог пада рефлектованог сигнала. Такође, за вредности диелектричне константе у распону од 8-16 интензитет рефлектованог сигнала задржава скоро константну вредност у првих 50 тачака на крацима хиперболичних рефлексија. Код диелектричних константи са вредностима преко 18 уочава се постепено одступање од устаљеног тренда, али су ове вредности ретке у пракси тако да не завређују већу пажњу.

5.4.2.1.4 Варирање дубине објекта

Наредни параметар који је анализиран је дубина објекта. У оквиру ове анализе посматран је опсег дубине објекта од $0.3m$ до $1m$, са итеративним увећањем дубине од $10cm$. Овај опсег дубине узет је првенствено и због фреквенције антене од $900MHz$ како би целокупан објекат био у домету ове антене. Добијени резултати ове анализе су приказани су Графику 5.23.

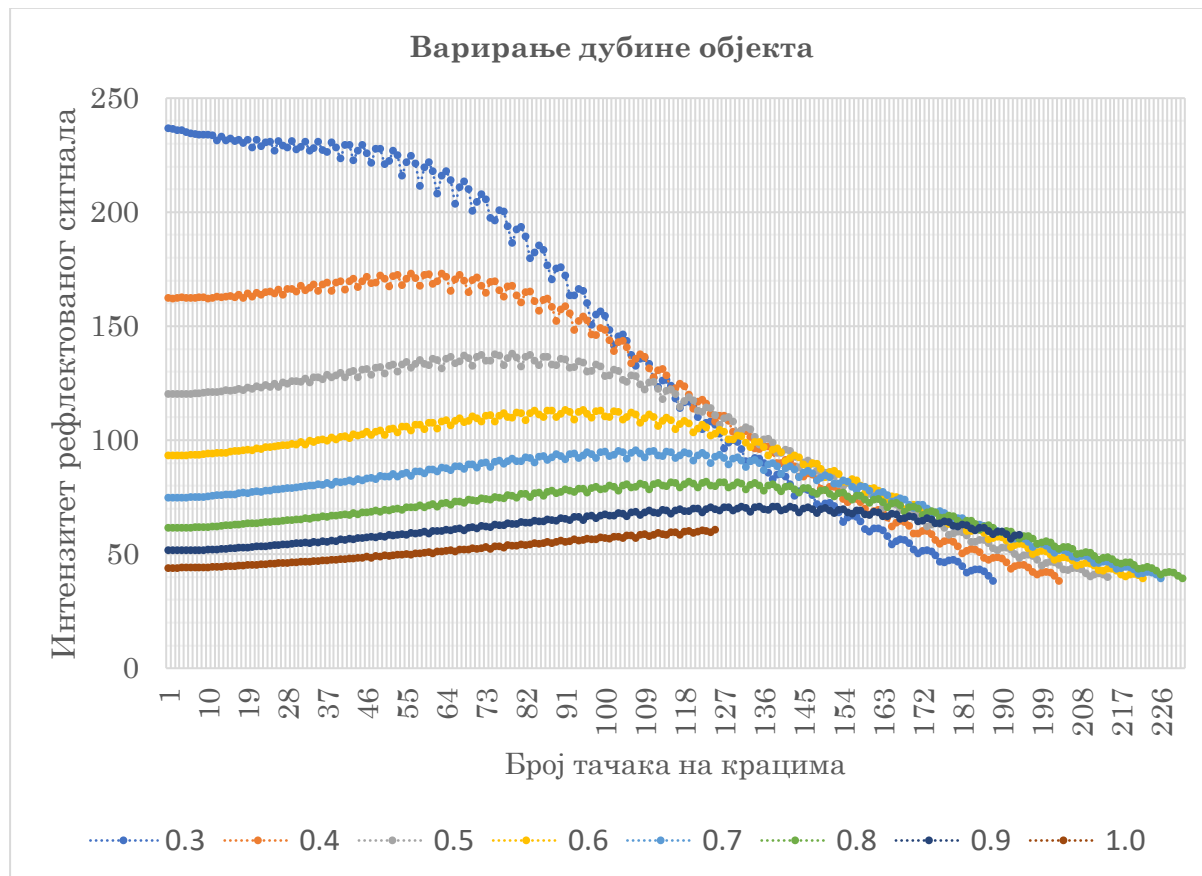


График 5.23 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању дубине објекта у опсегу од $0.3-1m$ дубине

Са графика се уочава да варирање дубине објекта од интереса утиче на интензитет рефлектованог сигнала тачака на крацима хиперболичних рефлексија. Утицај је такав да што је објекат на већој дубини долази до већег слабљења сигнала ЕМ таласа (мања је вредност интензитета рефлектованог сигнала). Ако се посматрају почетне вредности интензитета рефлектованог сигнала може се уочити да са константним повећањем дубине долази до слабљења интензитета за приближно половину претходног опсега. На пример, за дубину $30cm$ почетна вредност рефлектованог сигнала је $cca240$, за $40cm$ износи $cca160$, док за $50cm$ ова вредност износи $cca120$. Такође, краци хиперболичних рефлексија су краћи ако се објекат налази на мањој дубини, што значи да је мањи и број тачака на крацима хиперболичне рефлексије.

5.4.2.1.5 Варирање радијуса објекта

Следећи параметар који је анализиран је радијус објекта. Промена радијуса објекта анализирана је у опсегу од 20-200 mm , са итеративним увећањем од 20 mm . На Графику 5.24 приказане су добијене вредности интензитета рефлектованог сигнала тачака на десним крацима хиперболичних рефлексција.

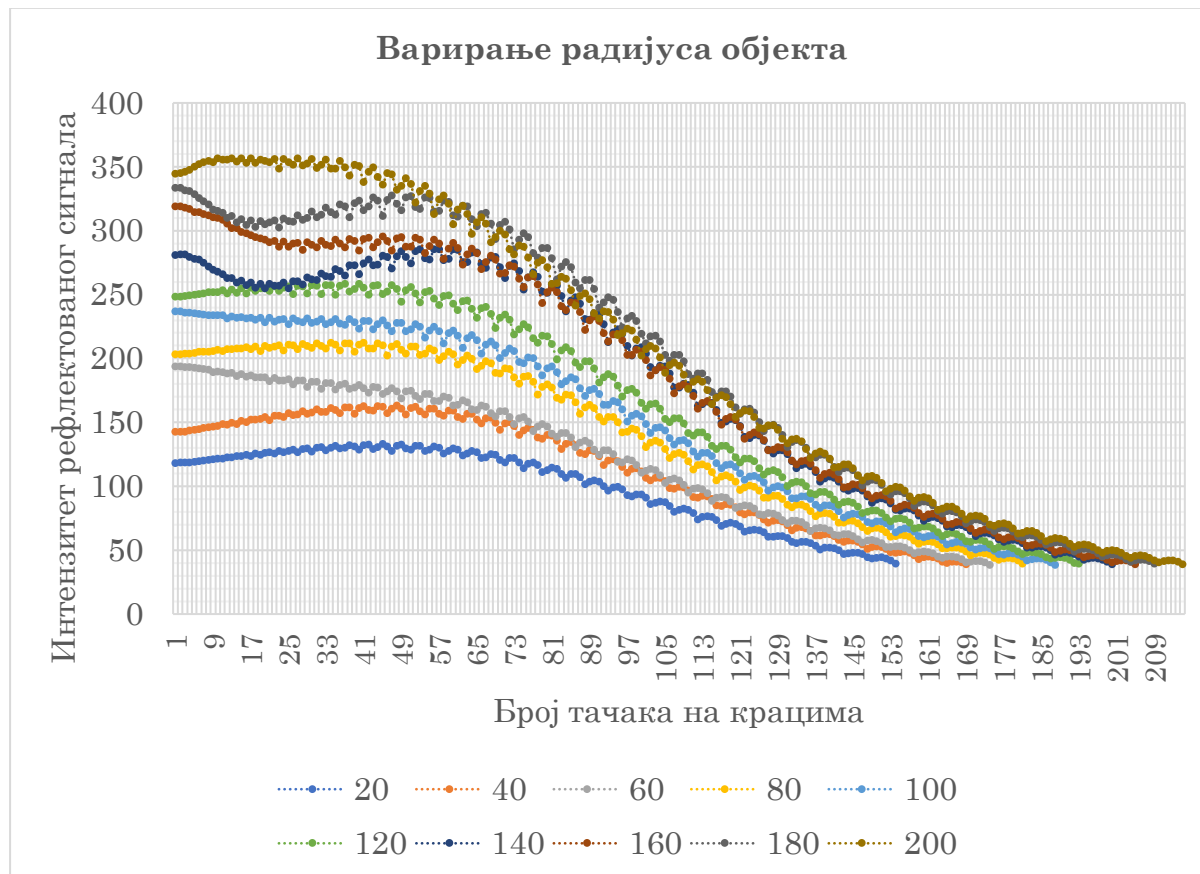


График 5.24 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексције при варирању радијуса објекта од интереса у опсегу од ДН20-ДН200

На основу добијених резултата уочава се да се повећањем пречника објекта од интереса повећава и интензитет рефлектованог сигнала. Тренд повећања интензитета је прилично уједначен након изгенерисаних $cca50$ тачака на крацима хиперболичних рефлексција, док у почетном делу (до 50-те тачке) доста варира. На пример, за радијус објекта 20, 40, 80, 120 и 200 mm у почетним тачкама на крацима долази до постепеног повећања интензитета рефлектованог сигнала а након $cca50$ -те тачке долази до њеног смањења. Са друге стране за радијус објекта од 60, 100 и 160 mm суштински не долази до повећања интензитета рефлектованог сигнала целом дужином крака. У последњу групу смештају се објекти радијуса 140 и 180 mm код којих прво долази до пада интензитета до $cca20$ -те тачке, затим до пораста у опсегу од $cca20$ -50-те тачке, а након тога до уједначеног пада интензитета рефлектованог сигнала.

5.4.2.1.6 Варирање материјала објекта

Последњи параметар који је анализиран је материјал објекта од интереса. Промена материјала објекта извршена је варирањем вредности диелектричне константе објекта у опсегу од 4 до 20. Добијени резултати са итеративним увећањем диелектричне константе за вредност 2 приказани су на Графику 5.25.

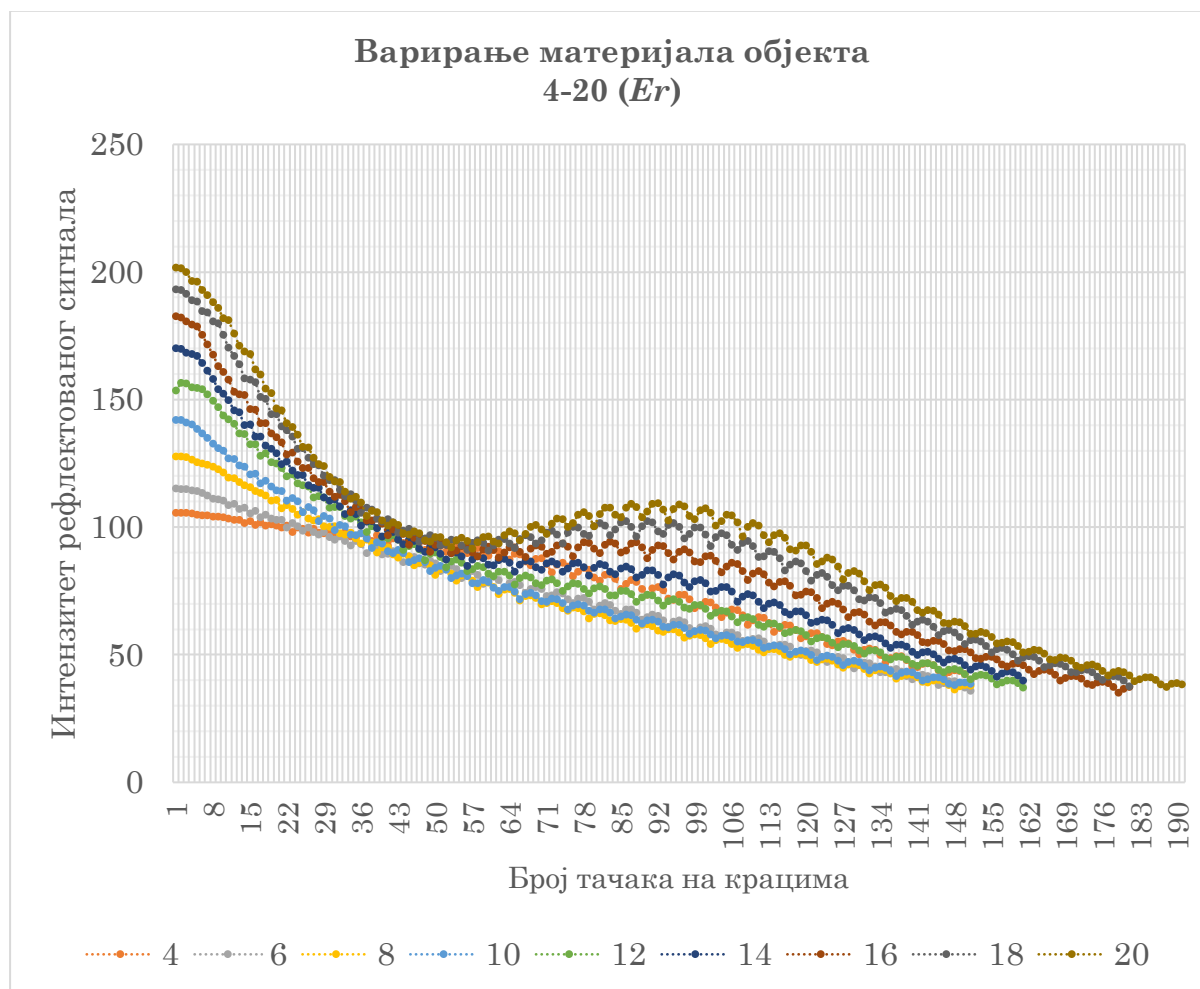


График 5.25 Интензитет рефлектованог сигнала за тачке на десном краку хиперболичне рефлексије при варирању материјала објекта у опсегу од 4-20 (ϵ_r)

Повећавањем вредности диелектричне константе материјала објекта од интереса повећава се вредност интензитета рефлектованог сигнала у темењу хиперболичне рефлексије. За вредности диелектричне константе из опсега 4-14 долази до постепеног пада вредности интензитета спуштајући се низ краке хиперболичне рефлексије. Кључне промене у интензитету рефлектованог сигнала настају у близини педесете тачке генерисане на крацима хиперболичне рефлексије, где за вредности диелектричних константи из опсега 16-20 долази до благог повећања релативне вредности интензитета након чега вредност интензитета рефлектованог сигнала поново опада.

5.4.2.1.7 Резиме

У првом делу овог поглавља приказан је поступак за издвајање тачака на крацима хиперболичних рефлексија. Предложени поступак показао се успешним и код места укрштања суседних крака хиперболичних рефлексија као и у случајевима асиметричних крака.

У другом делу овог поглавља извршена је детаљна анализа интензитета рефлектованог сигнала тачака на крацима хиперболичних рефлексија у оквиру које је извршено варирање шест параметара скенирања. На основу спроведене анализе долази се до следећих запажања:

- Варирањем фреквенције антене у распону од 100 до 600MHz уочавају се значајна одступања у интензитету рефлектованог сигнала. За фреквенције антена преко 600MHz наведене разлике постају све мање.
- Домет је једини анализирани параметар који не утиче на промену вредности интензитета рефлектованог сигнала.
- Диелектрична константа околног земљишта има прилично уједначен утицај на вредност рефлектованог сигнала, нарочито у опсегу од 5-15.
- Највећи утицај на промену интензитета рефлектованог сигнала има промена дубине објекта и то до дубине 70cm. Занемарљиве разлике настају код објеката на дубини преко 1m.
- Варирање радијуса објекта има прилично уједначену промену интензитета рефлектованог сигнала за скоро све вредности, са мањим одступањима.
- Повећањем диелектричне константе материјала објекта долази до благог повећања вредности интензитета рефлектованог сигнала.

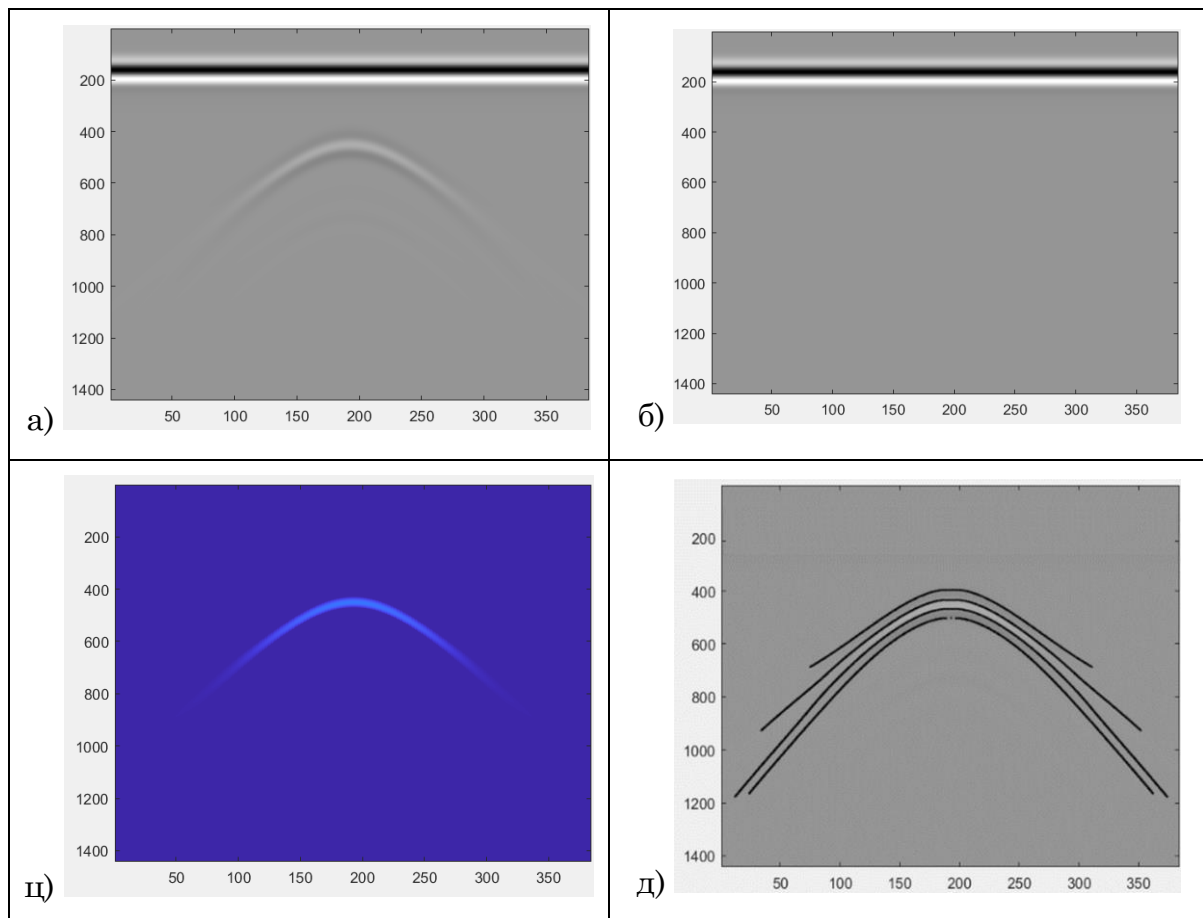
На основу извршених анализа вредности рефлектованог сигнала тачака на крацима хиперболичних рефлексија долази се до закључка да је вредност интензитета рефлектованог сигнала тачака на крацима хиперболичне рефлексије сложена. Поред тога, што њена вредност зависи од више параметара, њиховим варирањем уочава се да не постоји уједначен тренд раста или опадања рефлектованог сигнала. Такође, извршена анализа важна је и за први предложени алгоритам одређивања координата темена хиперболичне рефлексије код дефинисања обуке. Због варијација у интензитету рефлектованог сигнала при промени фреквенције антене најбоље је креирање обука вршити за појединачну фреквенцију антене. У овом процесу не треба занемарити и неке друге параметре који значајно утичу на интензитет рефлектованог сигнала, имајући у виду да они фигуришу у обуци. Ово правило важи без обзира да ли се обука креира на основу синтетичких или реалних радарграма. На основу извршених анализа закључује се да за дефинисање критеријума заустављања издвајања тачака на крацима није довољно анализирати само интензитет рефлектованог сигнала. Како би се критеријум заустављања у потпуности дефинисао имплементирани су додатни услови који су објашњени у наредним поглављима.

5.4.2.2 Анализа непосредне околине издвојених тачака на крацима хиперболичне рефлексције

Анализи непосредне околине тачака на крацима хиперболичне рефлексције претходило је креирање „теоријског обриса хиперболичне рефлексције“. Овај термин односи се на радарграм који садржи само рефлексiju насталу од објекта од интереса у виду хиперболичне рефлексije, а његово генерисање објашњено је у наставку.

5.4.2.2.1 Теоријски обрис хиперболичне рефлексije

За добијање теоријског обриса хиперболичне рефлексije извршено је генерисање два синтетичка радарграма са истим параметрима (Слика 5.27а, Слика 5.27б), с тим што један садржи а други не садржи хиперболичну рефлексiju. Након тога, формиран је трећи радарграм као разлика претходна два синтетичка радарграма (Слика 5.27ц). **Теоријски обрис хиперболичне рефлексije усвојен је за назив новонасталог радарграма**, јер разлика у интензитету рефлектованог сигнала настаје само на месту формирања хиперболичне рефлексije. На осталим местима у радарграму разлика је нула, јер на тим местима не долази до промена у структури и саставу симулираног земљишта.



Слика 5.27 Теоријски обрис хиперболичне рефлексije (ц)

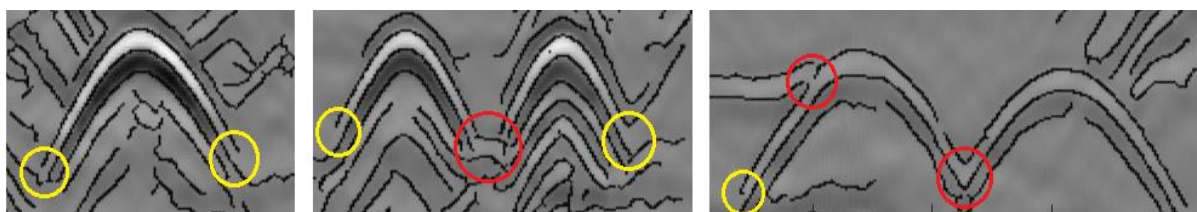
Ова анализа извршена је над синтетичким подацима, јер је због неизбежног присуства шума немогуће добити теоријски обрис хиперболичне рефлексije код реалних радарграма. Над обрисом хиперболичне рефлексije примењен је *Canny* детектор ивица (добијени резултат приказан је на Слици 5.27д). На основу добијених резултата уочава се да у зони обриса хиперболичне рефлексije постоје ивични пиксели, од којих се образује неколико хиперболичних рефлексija. У зони темена постоје ивични пиксели и на горњем и на доњем рубу. Собзиром да се у зони темена хиперболичне рефлексije јасно уочавају ивични пиксели и на горњем и на доњем рубу, а који се низ краке прате до одређене ширине то је искоришћено за даљу анализу (као основни критеријум провере).

У наставку дисертације истраживање се базира на анализи теоријске зоне крајева крака хиперболичне рефлексije, која је добијена на претходно описан начин. За ову анализу, током генерисања тачака на крацима хиперболичне рефлексije у свакој итерацији врши се провера следећих критеријума:

1. Постојаност ивичних пиксела на горњем и доњем рубу хип. рефлексije,
2. Анализа резидуала тачака на крацима хиперболичних рефлексija у односу на криву другог реда.

5.4.2.2 Провера постојаности ивичних пиксела на горњем и доњем рубу хиперболичне рефлексije

Информација о постојаности ивичних пиксела у зони обриса хиперболичне рефлексije користи се у наставку алгорита тако што се за сваки изгенерисан пиксел на крацима хиперболичне рефлексije проверава постојаност ивичних пиксела у његовој непосредној околини. Као што се уочава са Слике 5.27д ивични пиксели се генеришу и на горњем и на доњем рубу хиперболичне рефлексije, тако да се провера врши за оба руба. Ивични пиксели на доњем и горњем рубу су симетрични у односу на тачке које се генеришу на крацима хиперболичних рефлексija, што значи да се провера постојања ивичних пиксела може вршити са истим параметрима за оба руба. Нарушавање ове симетрије настаје на местима преклопа крака суседних хиперболичних рефлексija (жуте кружнице) или краја обриса хиперболичне рефлексije (црвене кружнице) (Слика 5.28).



Слика 5.28 Кључне зоне које нарушавају симетрију ивичних пиксела у односу на тачке генерисане на крацима хиперболичне рефлексije

Потпуно испуњавање услова подразумева постојање ивичних пиксела на оба руба хиперболичне рефлексije.

Провера ивичних пиксела на претходно објашњен начин има двојаку тежину:

- Додатну сегментацију ивичних пиксела. Уколико у почетној фази не постоје ивични пиксели на оба руба, такви ивични пиксели се елиминишу из даље анализе (сматра се да теоријски не могу да буду темна хиперболичних рефлексија). Овај критеријум је значајан за оба предложена алгорита, јер у првом случају елиминише неке од основних недостатака детекције зоне хиперболичне рефлексије попут лажне детекције, у другом алгоритму врши додатну сегментацију преосталих ивичних пиксела.
- Фигурише у критеријуму заустављања генерисања тачака на крацима хиперболичне рефлексије.

За проверу претходно објашњеног услова неопходно је усвојити зону у којој се врши провера постојања ивичних пиксела. С обзиром да се ова анализа врши дуж колоне текућег пиксела на крацима, потребно је одредити број врста у којима се врши провера. Знајући да врсте представљају број одбирака/*scan*-у у радарграму овај критеријум првенствено зависи од тог параметра. На основу спроведених анализа над радарграмима са различитим бројем одбирака/*scan*-у долази се до граничних вредности које су приказане у Табели 5.12.

Табела 5.12 Граничне вредности у оквиру којих се врши провера постојања ивичних пиксела

Број одбирака/<i>scan</i>-у	Граничне вредности
256	± 5
512	± 10
1024	± 20
2048	± 40

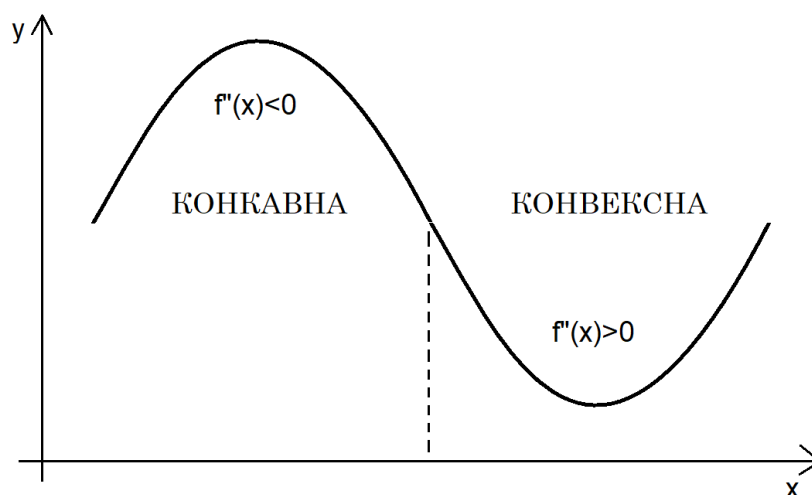
На основу вредности приказаних у претходној табели уочава се да се за двостуко већи број одбирака по *scan*-у и гранична вредност удвостручује (нпр. за 512 одбрака/*scan*-у износи ± 10 , док за 1024 одбрака/*scan*-у има вредност ± 20).

Применом дефинисаног услова долази се до закључка да он представља добар критеријум за елиминацију лажних хиперболичних рефлексија као и додатну сегментацију ивичних пиксела у другом алгоритму (*gprCAPEX*). Међутим, за усвајање финалног критеријума заустављања за издвајање тачака на крацима није довољан, нарочито код укрштања крака суседних хиперболичних рефлексија или већег присуства шума у радарграму. Из тог разлога уводи се секундарни критеријум на основу кога се долази до финалног критеријума заустављања издвајања тачака на крацима хиперболичних рефлексија.

5.4.2.2.3 Анализа резидуала тачака на крацима хиперболичних рефлексива у односу на криву другог реда

Анализа која је извршена у оквиру овог подпоглавља састоји се из неколико корака:

1. Издвојене координате тачака које се генеришу на крацима хиперболичних рефлексива (Поглавље 5.4.1) апроксимирају се полиномом другог реда.
2. Врши се провера да ли графичка представа полинома има конкаван или конвексан облик. Ако се ради о конвексном облику анализирано теме хиперболичне рефлексиве се брише из даље анализе (смара се да се не ради о хиперболичној рефлексиви). Овај услов се проверава на основу другог извода полинома. Уколико је други извод мањи од нула ради се о конкавној кривој, док је у супротном реч о конвексној кривој (Слика 5.29).



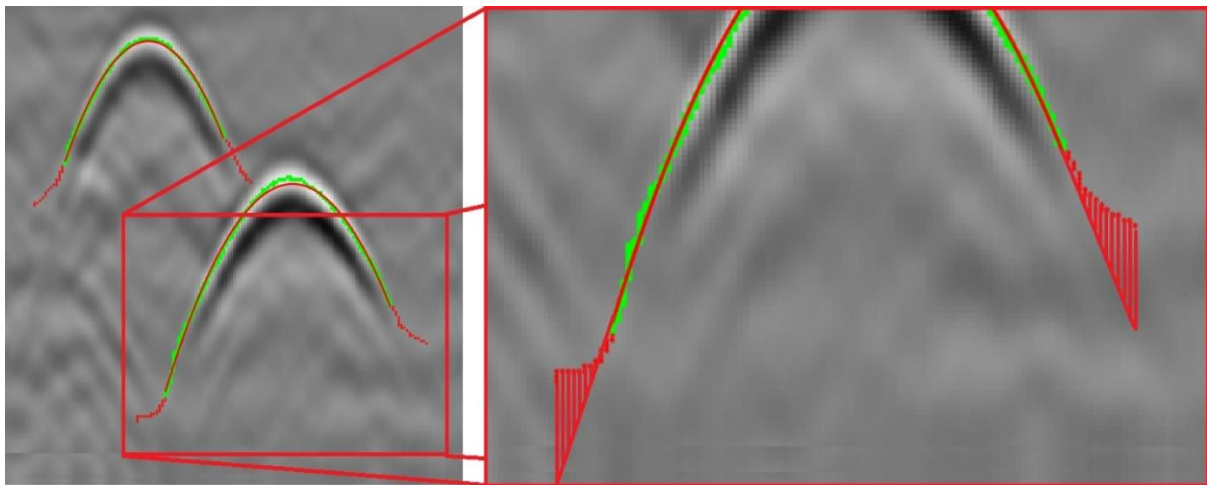
Слика 5.29 Изглед конкавне и конвексне криве

3. За сваку издвојену тачку из првог корака врши се прорачун одступања (резидуала) у односу на полином другог реда који их апроксимира.
4. Тачке на крацима се генеришу све док се појединачни квадрати резидуала налазе у дозвољеној толеранцији. Уколико је квадрат одступања сувише велик на самом почетку сматра се да генерисане тачке не формирају хиперболичну рефлексиву и анализирано теме хиперболичне рефлексиве се брише из даље анализе.

Одређивање теоријских вредности дозвољених одступања квадрата резидуала извршено је над синтетичким и реалним радарграмима. Дефинисање овог услова има двојаку тежину:

- а) Представља финални критеријум заустављања за генерисање тачака на крацима хиперболичне рефлексиве и
- б) Користи се за усвајање финалне колоне темена хиперболичних рефлексива.

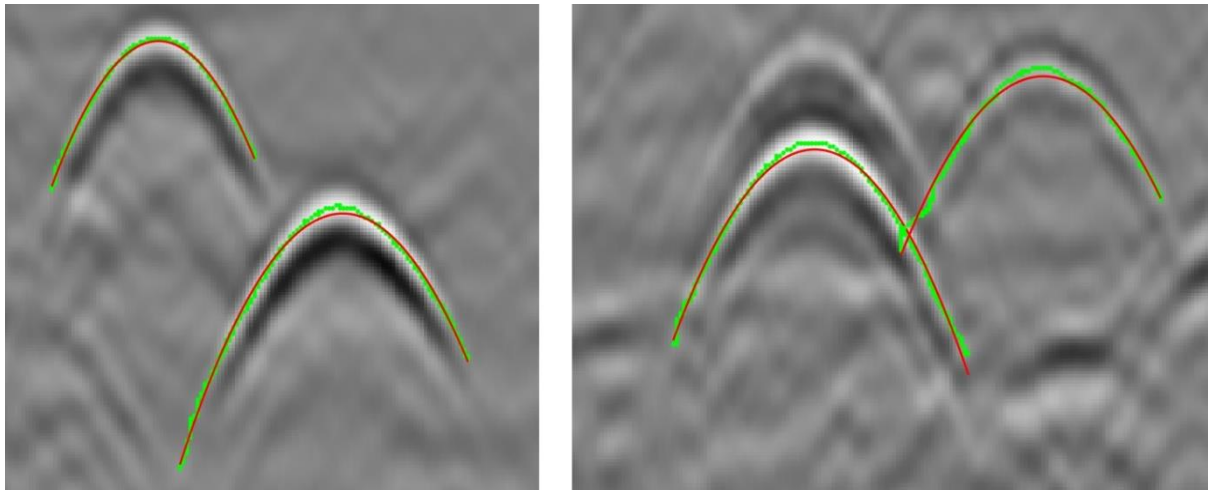
Број тачака од којих се врши фитовање у првој фази првенствено зависи од два параметра: број *scan/m* и број одбирака по *scan*-у. Уколико се квадрати резидуала за сваку издвојену тачку налазе у дозвољеним границама у односу на фитовану криву и ако се ради о конкавној кривој, проналази се наредни сет координата тачака на крацима. Прво се пронађу координате тачака на једном краку а затим врши прорачун одступања квадрата резидуала у односу на претходно добијену криву. Генерисање текуће тачке (Слика 5.30, зелени пиксели) врши се уколико су квадрати резидуала за сваку анализирану тачку (Слика 5.30, црвени пиксели) у дозвољеним границама одступања. У супротном текућа тачка се одбацује и ту се завршава претрага на анализираном краку хиперболичне рефлексije. Затим се иста провера врши и за други крак хиперболичне рефлексije све док тачке које се анализирају испуњавају наведене услове.



Слика 5.30 Тачке на крацима хиперболичних рефлексija за које се врши провера квадрата резидуала (црвени пиксели)

На претходно објашњен начин за сваку тачку на крацима хиперболичних рефлексija врши се итеративна провера дефинисаног критеријума. Такође ове тачке не фигуришу у генерисању криве другог реда, како не би нарушили њен облик пре провере дефинисаног критеријума.

Тестирајући услов базиран на овом приступу долази се до закључка да је гранична вредност у директној пропорцији са бројем пиксела који се проверава. То значи да алгоритам неће бити нарушен ако се за неколико пиксела повећа или смањи број пиксела за које се проверавају квадрати резидуала. Довољно је извршити пропорционално повећање дозвољене вредности квадрата резидуала у складу са повећањем броја издвојених координата тачака на крацима хиперболичних рефлексija за проверу. На Слици 5.31. приказан је један од финалних резултата издвајања тачака на крацима хиперболичних рефлексija, укључујући претходно дефинисан услов.



Слика 5.31 Финални сет издвојених координата тачака на крацима хиперболичних рефлексција, укључујући и полином другог реда који их апроксимира

Апроксимација издвојених координата тачака на крацима полиномом другог реда за ову анализу је довољно (иако се ради о хиперболи) јер она не представља финалну апроксимацију издвојених тачака на крацима, на основу које ће се нпр. вршити процена пречника детектованог вода. За тачнију апроксимацију потребно је користити математички модел хиперболе или додатно проширење које укључује и димензије објекта и медијум кроз који се простире ЕМ таласи.

На основу приказаних резултата за овако дефинисан критеријум заустављања укрштање крака суседних хиперболичних рефлексција не представља проблем. Зонска претрага радарграма на основу субматрице димензија 2×2 и начина претраге тачака на крацима објашњеног у Поглављу 5.4.1 наставиће претрагу низ краке хиперболичних рефлексција и након места укрштања суседних крака. Такође, овакав начин претраге је толерантан и на мање локалне сметње које постоје у радарграму или нека слична оштећења крака хиперболичне рефлексције.

Усвајање финалних координата темена хиперболичних рефлексција

На основу примењених критеријума за издвајање тачака на крацима хиперболичних рефлексција усвајају се финалне координате темена хиперболичних рефлексција. Прво се на основу тачака изгенерисаних на оба крака врши апроксимација полиномом другог реда. Затим се проналази тачка максимума формиране криве и њена колона се усваја за финалну колону темена хиперболичне рефлексције. У наставку се одређује финална врста тако што се од пиксела са финалном колоном и приближном врстом издвоји део радарграма у зони ± 10 пиксела по врсти. У издвојеној зони проналази се пиксел са највећим интензитетом рефлектованог сигнала чија се врста усваја за финалну врсту темена хиперболичне рефлексције.

5.4.2.3 Резиме

У претходна три подпоглавља извршене су анализе на основу којих је формиран финални критеријум заустављања издвајања тачака на крацима хиперболичних рефлексја.

Први део се бави формирањем теоријског обрса хиперболичне рефлексје. Добијени резултати обрса су значајни јер се на њима могу уочити теоријске границе крака хиперболичне рефлексје. На основу ове информације познато је у којој зони треба да се врше провере и формирање услова за издвајање тачака на крацима, попут вредности интензитета рефлектованог сигнала.

Други део обухвата проверу постојаности ивичних пиксела, јер је уочено да теоријски обрис хиперболичне рефлексје прате и ивични пиксели добијени применом *Canpy* детектора ивица. Ова провера се врши за оба руба хиперболичне рефлексје, са граничним вредностима претраге које се аутоматски прилагођавају параметрима аквизиције. Уколико у првих десет ивичних пиксела не постоје ивични пиксели са обе стране он се брише као и његове до тада изгенерисане тачке на крацима, јер се сматра да не испуњава услове о постојаности хиперболичне рефлексје на анализираној локацији радарграма. Овај критеријум је значајан за оба предложена алгорита у првом делу дисертације (*gprAPEX*, *gprCAPEX*), јер елиминише недостатке код првог и врши додатну сегментацију код другог алгорита.

У трећем делу формира се финални критеријум за издвајање тачака на крацима хиперболичних рефлексја. Финални критеријум подразумева апроксимацију издвојених тачака на оба крака хиперболичне рефлексје полиномом другог реда и прорачун резидуала за неколико наредних пиксела. Добијени резултати и примењене анализе показују да постоји директна веза у повећању броја пиксела за које се врши провера и граничне вредности квадрата резидуала.

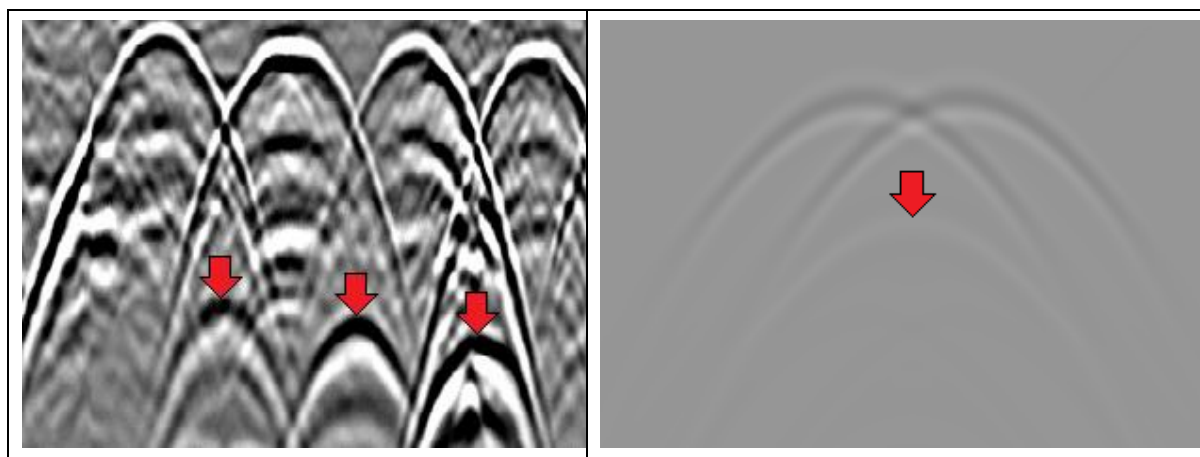
На основу извршених анализа долази се до следећих закључака:

- Повећањем броја тачака на оба крака хиперболичних рефлексја повећава се грешка резидуала у зони темена хиперболичне рефлексје. Ова информација је значајна, јер се на основу ње закључује да финалне координате темена не могу бити усвојене проналаском максимума креираног полинома.
- Квадрати резидуала представљају добар начин за препознавање стварних хиперболичних рефлексја као и критеријума за заустављање генерисања тачака на њиховим крацима.
- Овако дефинисан критеријум превазилази проблем укрштања суседних крака хиперболичних рефлексја, мањих општећења или присуства шума на делу хиперболичне рефлексје.
- Финалне координате тачака на крацима хиперболичних рефлексја издвајају се у блиско реалном времену.

Поред наведеног, алгоритам врши независно генерисање тачака за леви и десни крак хиперболичне рефлексije, што значи да није нужно да краци морају бити исте дужине. Ово је свакако добра особина имајући у виду да рефлексije од суседних објеката и друге препреке могу да заклањају један део хиперболичне рефлексije. На овакав начин претраге промена пречника и дубине на којој се објекат налази немају утицај.

5.5 Елиминација интерферираних хиперболичних рефлексиија

Интерфериране хиперболичне рефлексиије представљају лажне хиперболичне рефлексиије, које настају у процесу формирања радарграма. Њихова појава може се уочити и на реалним и на синтетичким радарграмима. Лажне хиперболичне рефлексиије које настају у зони пресека крака суседних хиперболичних рефлексиија (Слика 5.32) представљају конструктивну интерференцију. Локације темена ових хиперболичних рефлексиија приказане су са црвеним стрелицама на Слици 5.32.



Слика 5.32 Пример интерфериране хиперболичне рефлексиије над реалним и синтетичким радарграмом

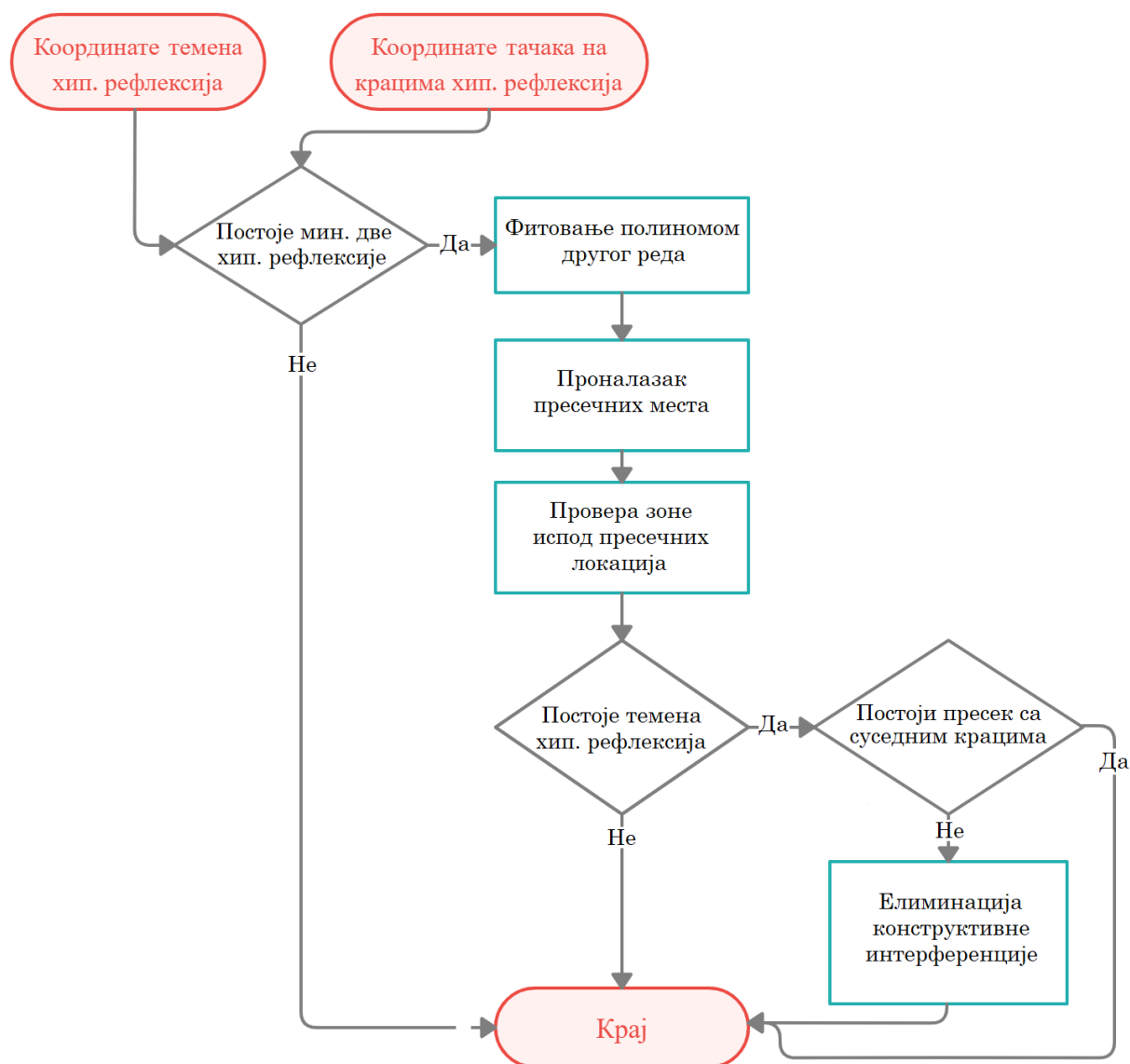
Основни проблем код препознавања ових хиперболичних рефлексиија огледа се у томе што су оне скоро истог облика као и стварне хиперболичне рефлексиије. Према најбољем сазнању аутора, директна елиминација ових хиперболичних рефлексиија до сада није детаљно проучавана, већ се она врши непосредно након примене миграције. Међутим, основни проблем у овом поступку је немогућност примене миграционог филтера у реалном времену. Стога је у оквиру ове дисертације предложен директан поступак за препознавање и елиминацију ових хиперболичних рефлексиија.

Потребан услов за постојање конструктивне интерференције је минимум две хиперболичне рефлексиије на радарграму. За случај да постоји само једна детектована хиперболична рефлексиија на радарграму ова анализа се изоставља.

За препознавање хиперболичних рефлексиија насталих конструктивном интерференцијом у оквиру ове дисертације као улазни сет података користе се претходно одређене координате тачака на крацима свих хиперболичних рефлексиија на радарграму и координате њихових темена.

Ова анализа се састоји из неколико корака (Слика 5.33):

1. На основу издвојених тачака на крацима за сваку хиперболичну рефлексију врши се апроксимација полиномом другог реда.
2. Проналазе се места пресека полинома из првог корака.
3. Проверава се зона испод пресечних координата. Уколико постоји хиперболична рефлексија чије су координате темена у овој зони и која нема пресек са полиномима од којих је формиран пресек таква хиперболична рефлексија се елиминира.



Слика 5.33 Блок дијаграм за елиминацију интерферираних хиперболичних рефлексија насталих као последица конструктивне интерференције

На претходно објашњен и приказан начин успешно се елиминишу хиперболичне рефлексије настале у поступку конструктивне интерференције. Њихова елиминација врши се у блиско реалном времену, тако да се не нарушава финално време процесирања радарграма.

6. Резултати и дискусија

Верификација предложених алгоритама за аутоматизовану обраду радарграма извршена је над реалним и синтетичким радарграмима. Кроз поступак верификације обухваћена су развијена решења у оквиру дисертације за детекцију хиперболичних рефлексива на радарграмима. Такође, поступак верификације извршен је применом обука креираних са различитим бројем и типом узорака, и то:

- Обуке које су креиране на основу реалних радарграма (300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 и 2000 узорка).
- Обуке које су креиране на основу синтетичких радарграма (300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 и 2000 узорка).
- Обуке креиране комбинацијом синтетичких и реалних радарграма (300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 и 2000 узорка)

Поред наведеног, тест примери су креирани варирањем фреквенција антена (200, 400, 500 и 900MHz), као и других аквизиционих параметара.

У Табели 6.1 наведени су задаци који су обухваћени практичним делом дисертације као и коришћене методе за њихову реализацију.

Табела 6.1 Задаци и коришћене методе за њихову реализацију

I. ДЕТЕКЦИЈА ХИПЕРБОЛИЧНИХ РЕФЛЕКСИЈА				II. ИЗДВАЈАЊЕ КООРД. ТАЧАКА НА КРАЦИМА		
УЛАЗНИ ПОДАЦИ	МЕТОД		ИЗЛАЗНИ ПОДАЦИ	УЛАЗНИ ПОДАЦИ	МЕТОД	ИЗЛАЗНИ ПОДАЦИ
РАДАРГРАМ (.dzt, .out, .jpg)	1) Зонска сегментација gprAPEX	a) <i>COD</i>	Коорд. темена хипербол. рефлексива	Коорд. темена хипербол. рефлексива	1) Зонска претрага	Коорд. тачака на крацима
		b) <i>R-CNN</i>				
	2) Тачкаста сегментација gprCAPEX	a) <i>Capnu</i>				

У наставку су приказани добијени резултати процесираних радарграма применом претходно наведених обука и развијених алгоритама. Верификација је извршена над репрезентативним примерима са постепеним повећањем сложености радарграма и утицаја шума. Опште карактеристике репрезентативних примера наведене су у Табели 6.2

Табела 6.2 Опите карактеристике репрезентативних примера

Пример	Антена [MHz]	Обука				Одлике											
		Бр. узорака	Реални	Синтегички	Комбиновани	Број хипер. рефлексива				Процент шума			Среди -на		Интерференција	Оштећења крака	Арматурна мрежа
						1	2	3	>4	Мали	Средњи	Велики	Хомогена	Хетероген			
#1	400	1500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#2	200	1200	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#3	400	1800	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#4	400	1200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#5	400	1200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#6	400	1000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#7	400	1200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#8	400	2000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#9	400	900	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#10	400	1800	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#11	900	1500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#12	500	2000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#13	500	1200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#14	400	1500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
#15	400	2000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#16	400	1200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
#17	900	1200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

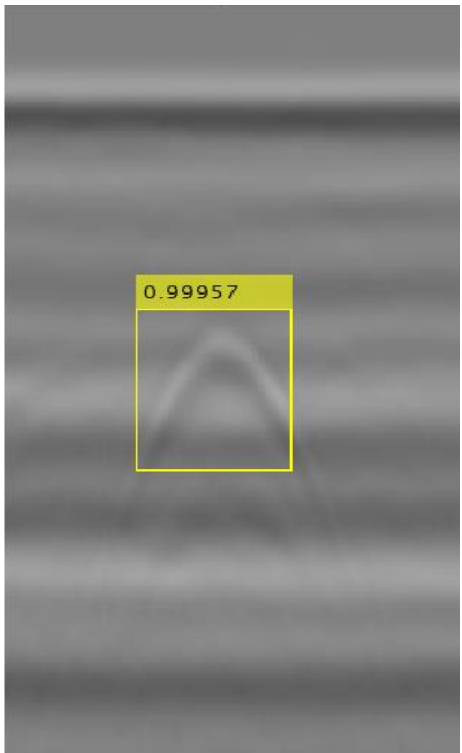
6.1 Аутоматизовано препознавање хиперболичних рефлексја

У оквиру овог поглавља приказани су резултати добијени применом развијених алгоритама за аутоматизовано препознавање хиперболичних рефлексја. Као репрезентативни примери коришћени су радарграми са различитим аквизиционим параметрима, попут различите фреквенције антене, броја одбирака по *scan*-у, различите дужине радарграма и слично.

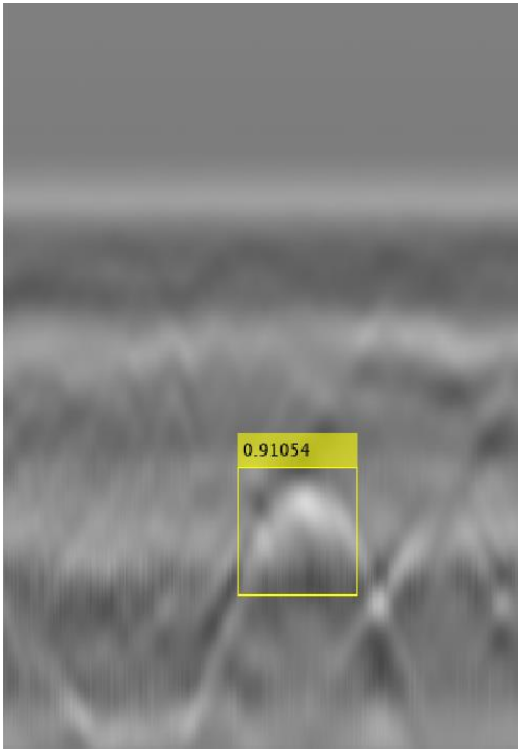
Такође, процесирање је приказано за различит број узорака у обукама и за сва три низа обука: обуке креиране на основу реалних, синтетичких или комбинацијом оба типа радарграма.

Како би се стекао што бољи увид у добијене резултате за сваки тест пример наведени су подаци о алгоритму и обуци која је примењена, као и аквизициони параметри, попут: централне фреквенције антене, дужине радарграма, диелектричне константе и слично.

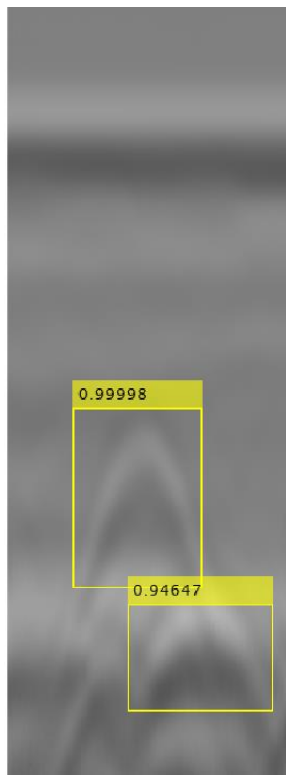
Тест #1	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1500 реалних узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	3.3
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	1024
<i>scan/m</i> :	55
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	6
<i>Range</i> [ns]:	30



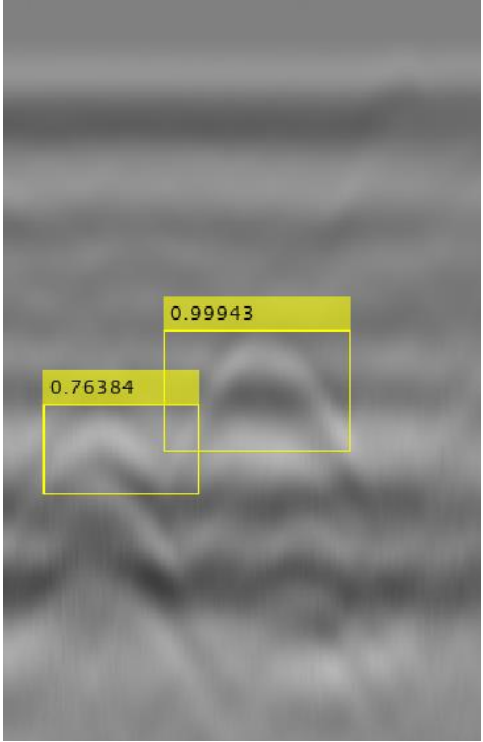
Тест #2	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1200 реалних узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	200
Дужина [m]:	7.9
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	512
<i>scan</i> /m:	50
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	4
<i>Range</i> [ns]:	35



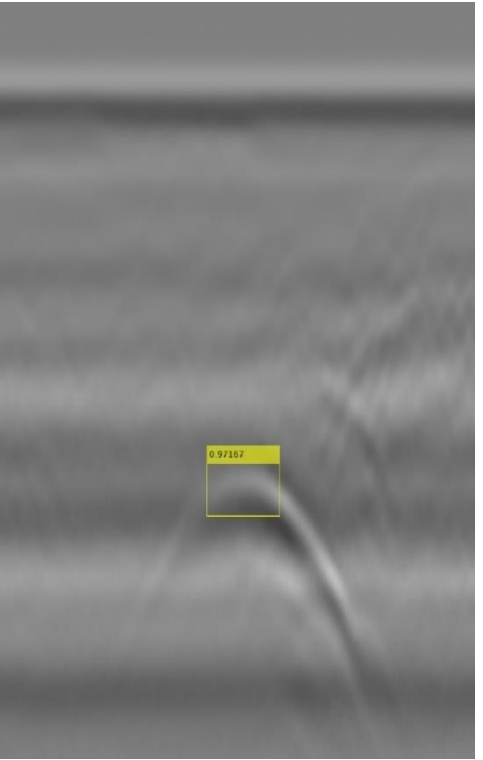
Тест #3	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1800 синтетичких узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	2.1
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	1024
<i>scan</i> /m:	100
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	8
<i>Range</i> [ns]:	31



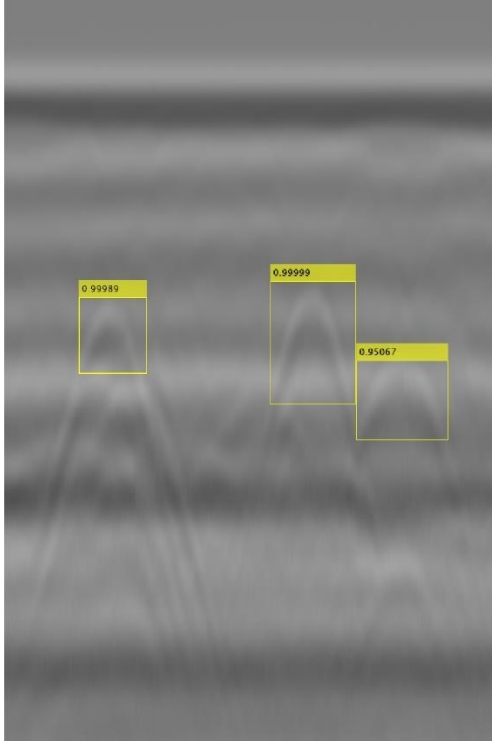
Тест #4	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1200 синтетичких узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	3.0
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	512
<i>scan/m</i> :	100
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	6
<i>Range</i> [ns]:	25



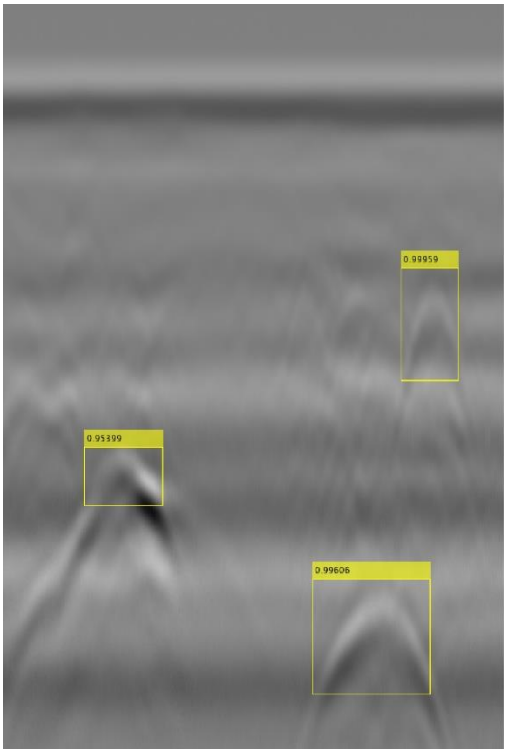
Тест #5	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1200 синтетичких узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	7.2
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	1024
<i>scan/m</i> :	100
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	6
<i>Range</i> [ns]:	30



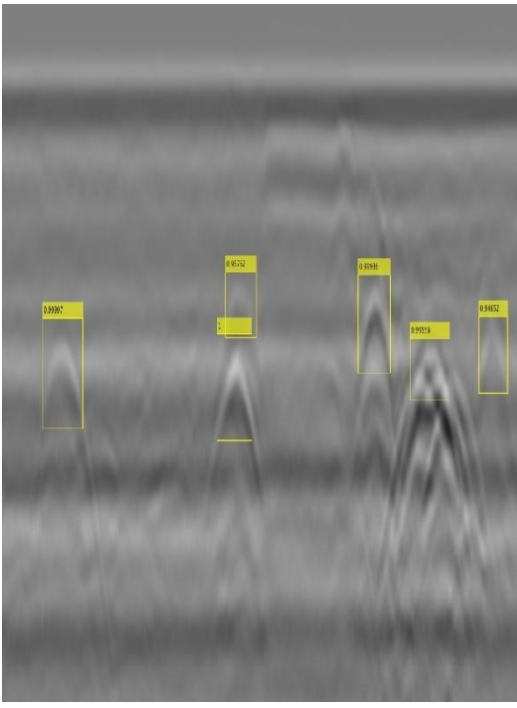
Тест #6	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1000 комбинованих узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	4000
Дужина [m]:	6.8
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	1024
<i>scan</i> /m:	100
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	6
<i>Range</i> [ns]:	30



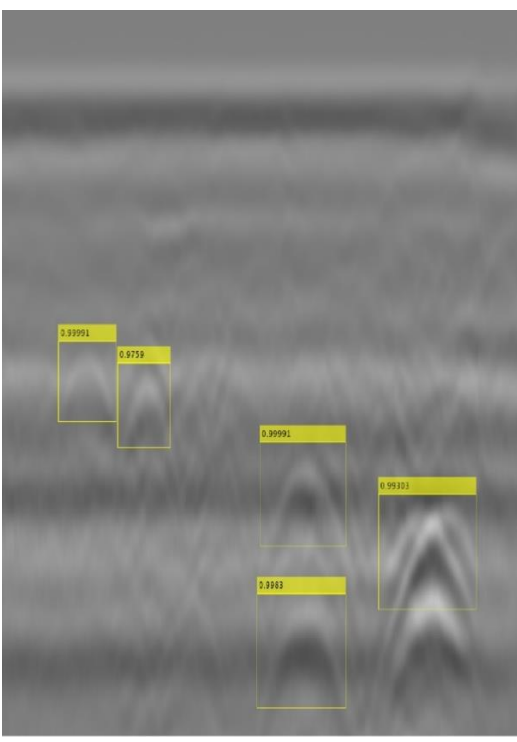
Тест #7	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1200 синтетичких узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	7.5
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	1024
<i>scan</i> /m:	100
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	6
<i>Range</i> [ns]:	30



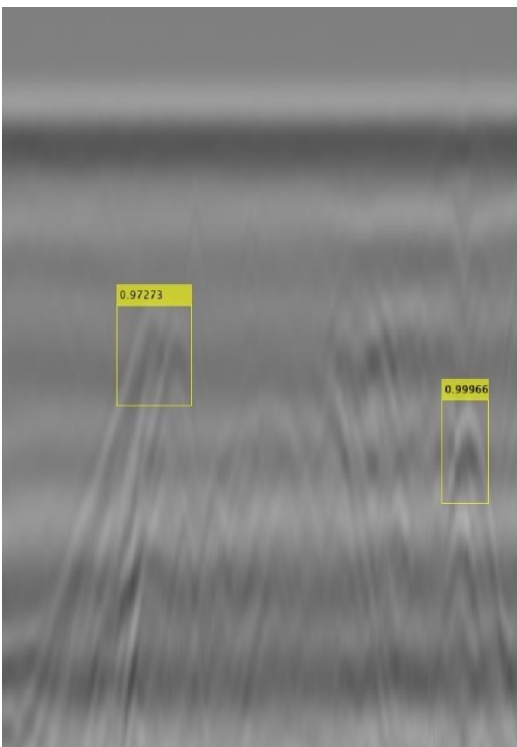
Тест #8	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>2000 комбинованих узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	16.6
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	1024
<i>scan/m</i> :	100
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	6
<i>Range</i> [ns]:	30



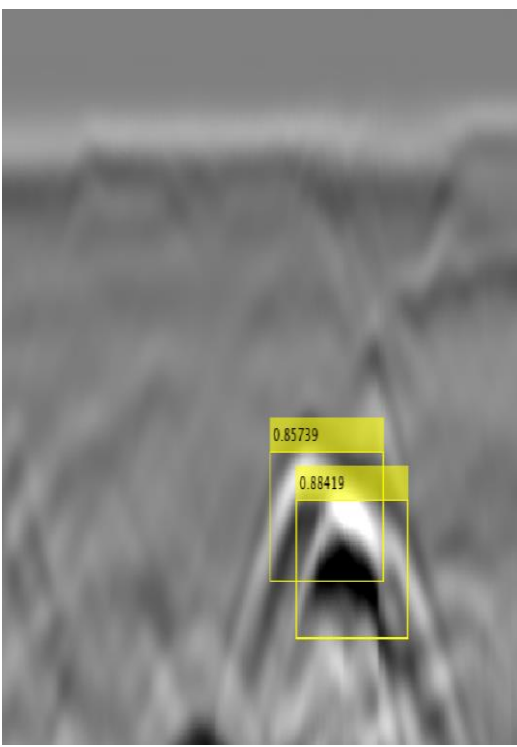
Тест #9	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>900 комбинованих узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	9.8
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	1024
<i>scan/m</i> :	100
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	6
<i>Range</i> [ns]:	30



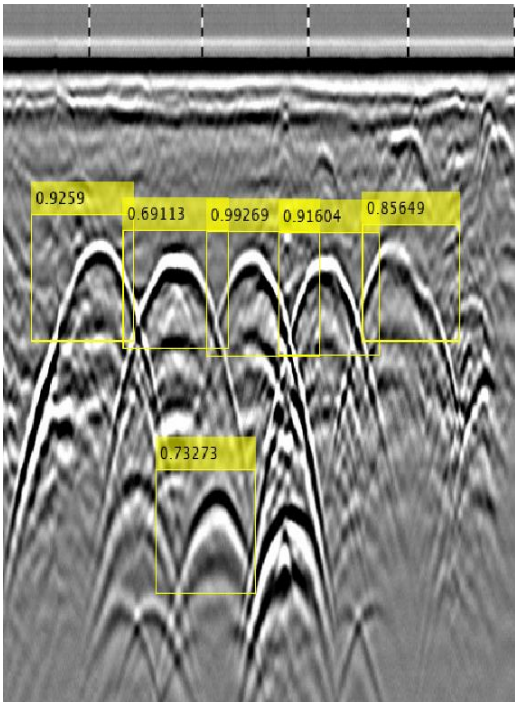
Тест #10	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1800 синтетичких узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	6.2
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	1024
<i>scan</i> /m:	50
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	6
<i>Range</i> [ns]:	27



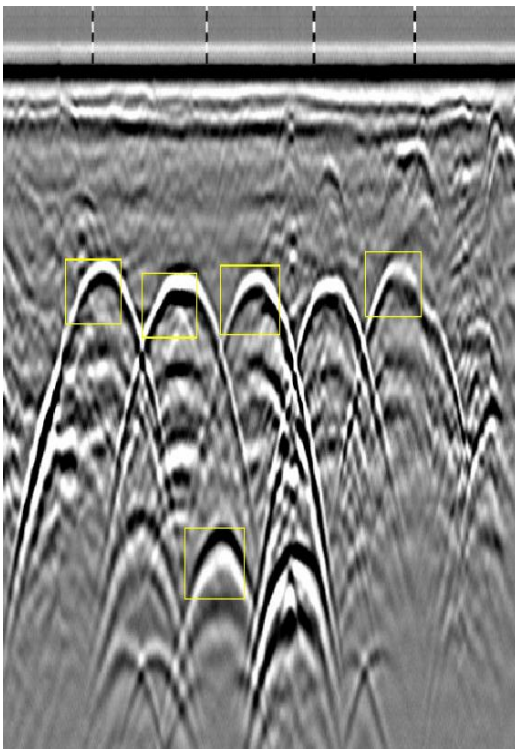
Тест #11	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1500 реалних узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	900
Дужина [m]:	6.9
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	512
<i>scan</i> /m:	100
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	5.5
<i>Range</i> [ns]:	31



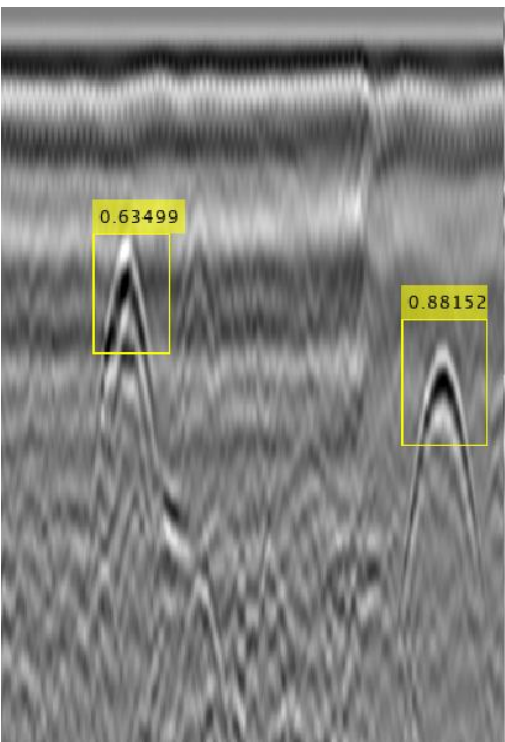
Тест #12	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>2000 реалних узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	500
Дужина [m]:	/
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	512
<i>scan/m</i> :	/
Битова по одбирку:	8
Диел. константа:	/
<i>Range</i> [ns]:	60



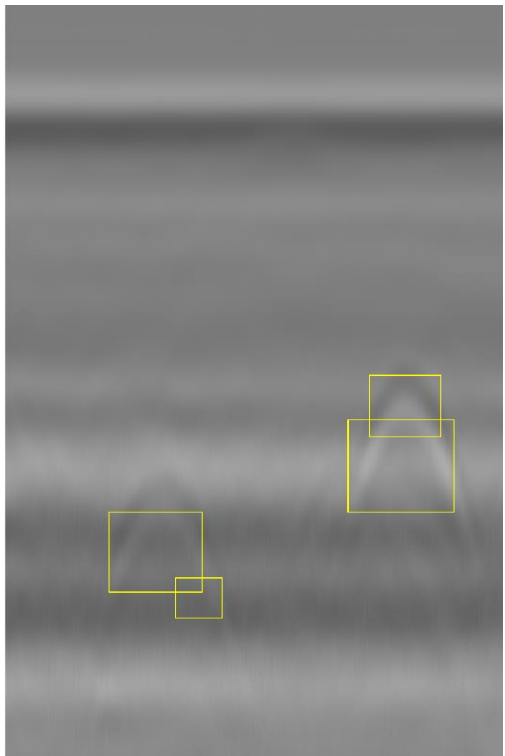
Тест #13	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>COD</i>
Обука:	<i>1200 синтетичких узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	500
Дужина [m]:	/
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	512
<i>scan/m</i> :	/
Битова по одбирку:	8
Диел. константа:	/
<i>Range</i> [ns]:	60



Тест #14	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>
Обука:	<i>1500 комбинованих узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	13.16
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	512
<i>scan/m</i> :	25
Битова по одбирку:	8
Диел. константа:	14.96
<i>Range</i> [ns]:	30



Тест #15	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>
Базна сегментација:	<i>COD</i>
Обука:	<i>2000 реалних узорака</i>
Тип радарграма:	<i>реални</i>
Аквизициони параметри	
Антена [MHz]:	400
Дужина [m]:	4.2
Одбирака/ <i>scan</i> -у:	1024
<i>scan/m</i> :	100
Битова по одбирку:	16
Диел. константа:	6
<i>Range</i> [ns]:	30



Тест #16			
Детаљи алгоритма		Аквизициони параметри	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>	Антиена [MHz]:	400
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>	Дужина [m]:	/
Обука:	<i>1200 синтет. узорака</i>	Одбирака/scan-у:	512
Тип радарграма:	<i>реални</i>	<i>scan/m:</i>	/
		Битова по одбирку:	16
		Диел. константа:	7.5
		<i>Range [ns]:</i>	85

Тест #17			
Детаљи алгоритма		Аквизициони параметри	
Алгоритам:	<i>gprAPEX</i>	Антиена [MHz]:	900
Базна сегментација:	<i>fasterR-CNN</i>	Дужина [m]:	12.48
Обука:	<i>1200 синтет. узорака</i>	Одбирака/scan-у:	512
Тип радарграма:	<i>реални</i>	<i>scan/m:</i>	200
		Битова по одбирку:	16
		Диел. константа:	6.25
		<i>Range [ns]:</i>	16

Применом детектора креираног на основу дубоке неуронске мреже за сваку хиперболичну рефлексију на рарадарграму добија се вероватноћа њене детекције. Ова вредност исписује се изнад оквира добијених применом одговарајућег детектора. На основу ових вредности стиче се бољи увид у могућности и успешност креираног детектора. У Табели 6.3 приказана је **просечна вероватноћа детекције за све хиперболичне рефлексије** добијене за репрезентативне тест примере, која у просеку **износи 0.93 или 93%**.

Табела 6.3 Просечна вероватноћа детекције хиперболичних рефлексија на репрезентативним тест примерима

Пример	Хиперболична рефлексија							Просечна вероватноћа детекције
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	
#1	0.99							0.99
#2	0.91							0.91
#3	0.99	0.95						0.97
#4	0.76	0.99						0.88
#5	0.97							0.97
#6	0.99	0.99	0.95					0.98
#7	0.95	0.99	0.99					0.98
#8	0.99	1.00	0.96	0.96	0.96			0.97
#9	0.99	0.97	0.99	0.99	0.99			0.99
#10	0.97	0.99						0.98
#11	0.86	0.88						0.87
#12	0.93	0.69	0.99	0.92	0.86	0.73		0.85
#14	0.63	0.88						0.76
#16	0.69	0.99	0.97	0.99	0.99	0.97		0.93
#17	0.84	0.99	0.99	0.79	0.98	0.99	0.81	0.91
Финална просечна вредност:								0.93

Применом развијених алгоритама у оквиру дисертације за аутоматизовано препознавање и издвајање тачака на крацима хиперболичних рефлексија, а на основу добијених резултата уочена су одређена запажања. У наредним подпоглављима наведена су сва значајна запажања наведена појединачно за *gprAPEX* и *gprCAPEX* алгоритам као и за алгоритам издавајања тачака на крацима хиперболичних рефлексија.

6.1.1 Зонска сегментација радарграма – *gprAPEX* алгоритам

Применом зонске сегментације радарграма на основу два различита приступа (*COD* и *fasterR-CNN*) за детекцију хиперболичних рефлексија, уочена су следећа запажања:

- *COD* алгоритам је осетљивији на нове улазне податке у односу на *fasterR-CNN*. Под новим улазним подацима мисли се на радарграме који се у већој мери разликују од радарграма који фигуришу у процесу обуке. Овај закључак изведен је на основу чињенице да се применом *COD* детектора као резултат добија знатно већи проценат лажне стопе детекције у односу на *CNN*.
- применом *fasterR-CNN* над коришћеним тест примерима добијени су бољи резултати детекције хиперболичних рефлексија у односу на *COD* детектор.
- Основна предност *COD* детектора огледа се у брзини његовог креирања (нпр. за 2000 позитивних узорака и 4000 негативних узорака обуке време креирања детектора није прелазило 2 минута). Ово омогућује знатно брже варирање параметара у односу на *fasterR-CNN* где је обука за 2000 позитивних узорака трајала преко 21 сат. Код појединих детектора време обучавања *COD* детектора је и преко 1000 пута брже (Табела 5.6).
- *COD* захтева велик број негативних узорка. С обзиром на различитости у структури и саставу земљишта тешко је креирати универзалан детектор без додавања нових негативних узорака, а да се проценат успешности детекције не погорша.
- *fasterR-CNN* показао се робуснији и мање осетљив на детекторе у којима су синтетички радарграми комбиновани са реалним подацима.
- Додатна предност *fasterR-CNN* огледа се у добијању вероватноће детекције сваке хиперболичне рефлексије на радарграму.
- Недостатак *fasterR-CNN* је приметан при детекцији хиперболичних рефлексија које су међусобно интерфериране (краци хиперболичних рефлексија се једним делом преклапају - попут топловодних цеви у земљаном рову, Тест #9). У овом случају обе хиперболичне рефлексије су у већини случајева препознате као један објекат. Овај недостатак се може превазићи претрагом координата темена хиперболичних рефлексија са обе стране (Поглавље 5.3.1.4).
- Креирање детектора на основу *fasterR-CNN* алгоритма знатно је сложеније и захтева рачунаре са високим перформансама како би њихово формирање било могуће.
- Креирани детектори су у могућности да препознају и хиперболичне рефлексије за пречнике објеката чији су краци шири или ужи у односу

на узорке који фигуришу у обукама. Разлог за ово огледа се првенствено у ширини крака хиперболичних рефлексија који не зависи само од пречника објекта него и других параметара, попут дубине, брзине простирања ЕМ таласа, коришћене антене и слично. На овај начин могуће је добити сличан геометријски облик хиперболичне рефлексије за различите параметре објеката.

- Детектори који су генерисани само на основу синтетичких радарграма били су успешни и над великим бројем реалних радарграма.
- Детектори настали комбиновањем синтетичких и реалних радарграма у мањем проценту повећавају успешности детекције у односу на детекторе креиране само на основу синтетичких узорака.
- Најбољи резултати детекције постигнути су применом детектора који су креирани само од реалних узорака.
- Повећањем узорака у обуци постиже се бољи проценат детекције хиперболичних рефлексија код оба алгоритма.
- Применом предложених алгоритама остварује се детекција хиперболичних рефлексија у блиско реалном времену.

Основна предност предложених алгоритама у односу на постојеће је висока стопа детекције хиперболичних рефлексија, нарочито код *fasterR-CNN* детектора, која над анализираним примерима износи преко 93%. Поред тога, *fasterR-CNN* детектор се показао и веома успешним и код сложенијих радарграма (нпр. тест примери: #9, #12, #17), радарграма са већим процентом шума (нпр. тест примери: #2, #10, #12) или радарграма који садрже хиперболичне рефлексије са већим оштећењима једног крака (нпр. тест примери: #5, #7, #10, #12). Време процесирања радарграма је у блиско реалном времену за све предложене алгоритме.

На основу извршених анализа уочава се да детектор креиран применом *fasterR-CNN* има далеко бољу детекцију у односу на *COD* детектор са неупоредиво мањом стопом лажне детекције.

6.1.2 Тачкаста сегментација радарграма – *gprCAPEX* алгоритам

Применом тачкасте сегментације радарграма за детекцију хиперболичних рефлексација, уочено је следеће:

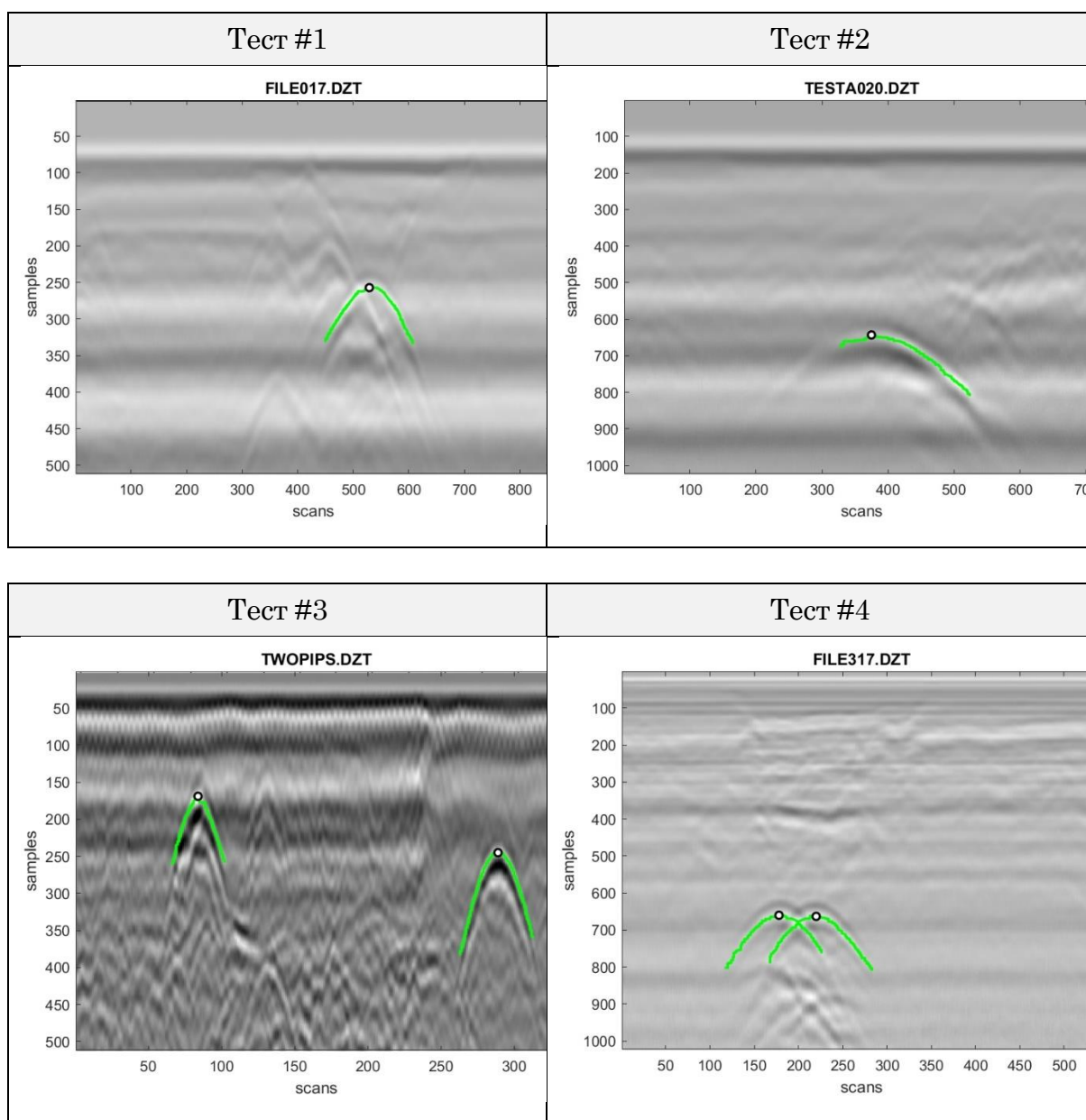
- Предложене фазе алгоритма базираног на тачкастој сегментацији вишеструко убрзавају обраду и процесирање радарграма у односу на постојеће алгоритме из ове групе.
- На основу предложених фаза процесирања радарграма и код тачкасте сегментације се извршава у блиско реалном времену.
- Тачкаста сегментација је више осетљива на шумове садржане у реалним радарграмима у односу на алгоритме зонске сегментације. Међутим, са пажљиво одабраним критеријумима и узимањем у обзир геометријски облик хиперболичних рефлексација ивични пиксели се у значајној мери могу редуковати, чиме се постижу бољи резултати.
- Основна предност тачкасте сегментације у односу на зонску огледа се у директном проналаску приближних координата темена хиперболичних рефлексација, за разлику од зонске сегментације где се претрага ових координата врши посебно за сваки оквир *bbox*-а.

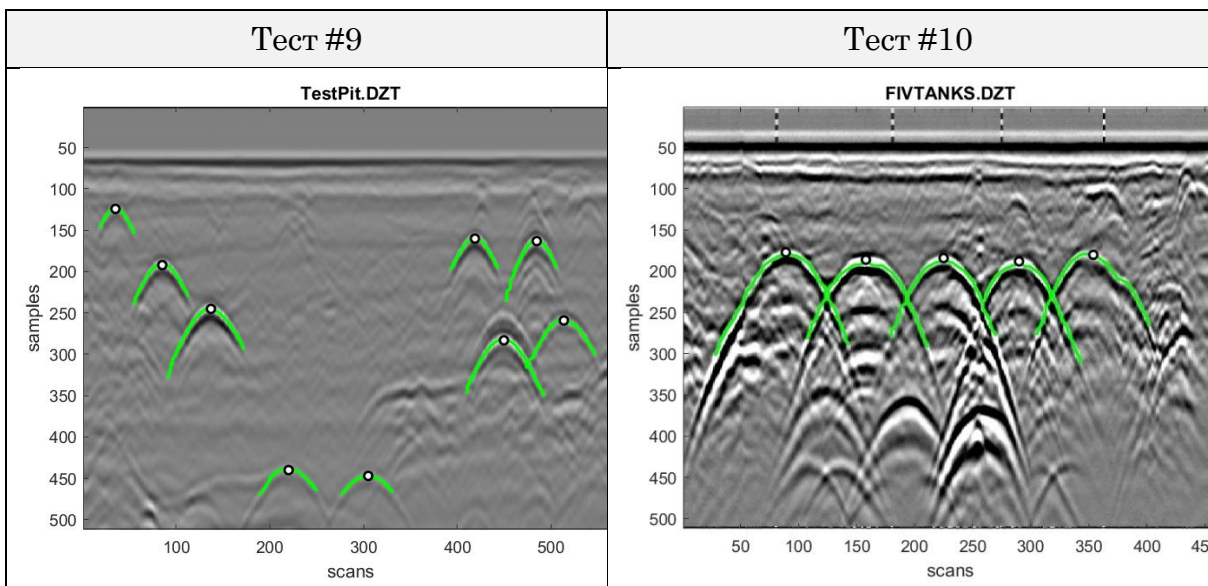
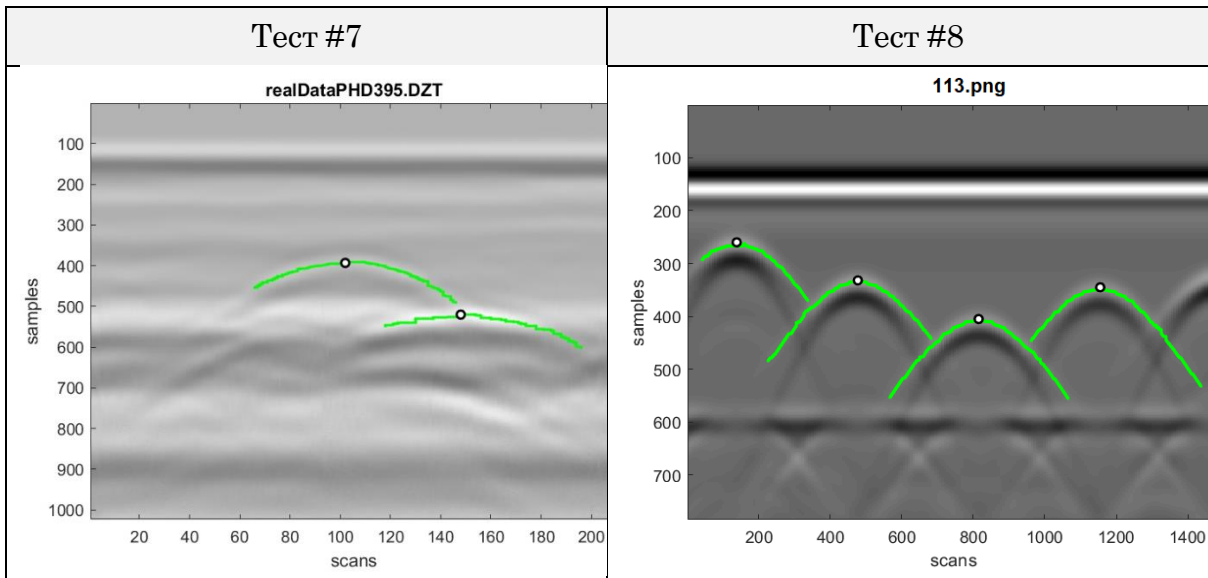
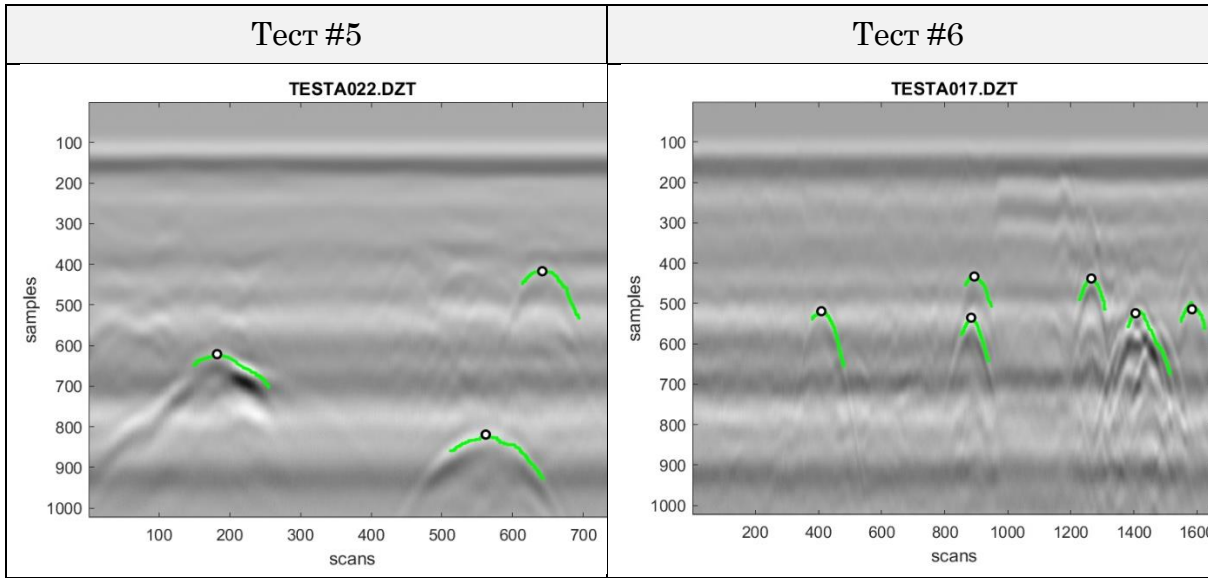
Унапређења алгоритма базираног на тачкастој сегментацији који је развијен у оквиру ове дисертације у поређењу са радом [6] огледа се у следећем:

- Број полазних ивичних пиксела који се тестира у наредним фазама алгоритма редукује се за око 95% у првој фази алгоритма, чиме се значајно смањује време процесирања и непотребне провере пиксела који теоријски не могу да буду темена хиперболичних рефлексација.
- Додатна елиминација већег броја ивичних пиксела врши се и у фази препознавања ивичних пиксела који дефинишу приближно хоризонталне слојеве у радарграму.
- Све предложене фазе елиминације ивичних пиксела врше се у блиско реалном времену.
- У свакој итерацији код генерисања тачака на крацима може да се врши предикција јединствене математички дефинисане хиперболе, док се у раду [6] врши генерисање опсега математички дефинисаних хипербола са различитим радијусом за сваки ивични пиксел. Предикцијом једначине која најбоље апроксимира дате податке време процесирања се вишеструко смањује.
- Применом развијеног алгоритма у оквиру дисертације време процесирања алгоритма [6] би се убрзало за минимум 85%.

6.2 Издвајање тачака на крацима хиперболичних рефлексива

У овом поглављу приказани су резултати добијени применом алгоритма за аутоматизовано издвајање координата тачака на крацима. Поред издвојених координата тачака (зелени пиксели на радарграмима) приказане су и финалне координате темна хиперболичних рефлексива (беле кружнице). За примере коришћени су радарграми са различитим аквизиционим параметрима, попут различите фреквенције антене, броја одбирака по *scan*-у, радарграми различите дужине и слично. Добијени резултати приказани су за десет репрезентативних примера, са различитим степеном сложености.





Предложени алгоритам за издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексја, извршен над репрезентативним примерима, показао се успешан. У Табели 6.4 приказан је финални сет координата тачака издвојених за десни крак прве хиперболичне рефлексје са примера #7.

Табела 6.4 Финални сет издвојених координата тачака на једном краку детектоване хиперболичне рефлексје

Издвојене координате тачака на десном краку (Тест #7)														
Ред. број	x	y	Ред. број	x	y	Ред. број	x	y	Ред. број	x	y	Ред. број	x	y
1	102	390	26	119	405	51	130	427	76	135	447	101	141	472
2	103	390	27	119	406	52	130	428	77	135	448	102	141	473
3	104	391	28	120	407	53	130	429	78	135	449	103	142	474
4	105	391	29	121	408	54	131	429	79	136	450	104	143	475
5	106	391	30	122	409	55	131	430	80	136	451	105	144	476
6	107	391	31	122	410	56	131	431	81	137	452	106	144	477
7	108	391	32	123	411	57	131	432	82	137	453	107	144	478
8	109	391	33	123	412	58	131	433	83	137	454	108	144	479
9	110	391	34	123	413	59	132	433	84	138	455	109	144	480
10	110	392	35	124	413	60	132	434	85	139	456	110	144	481
11	111	393	36	124	414	61	132	435	86	139	457	111	144	482
12	111	394	37	125	415	62	133	435	87	139	458	112	144	483
13	112	394	38	126	416	63	133	436	88	139	459	113	144	484
14	112	395	39	126	417	64	133	437	89	140	460	114	145	485
15	113	395	40	127	418	65	133	438	90	140	461	115	145	486
16	114	396	41	127	419	66	134	438	91	140	462	116	145	487
17	115	397	42	127	420	67	135	438	92	140	463	117	145	488
18	115	398	43	128	421	68	135	439	93	141	464	118	145	489
19	115	399	44	128	422	69	135	440	94	141	465	119	146	490
20	116	399	45	128	423	70	135	441	95	141	466			
21	117	400	46	128	424	71	135	442	96	141	467			
22	118	401	47	128	425	72	135	443	97	141	468			
23	118	402	48	129	425	73	135	444	98	141	469			
24	118	403	49	129	426	74	135	445	99	141	470			
25	119	404	50	129	427	75	135	446	100	141	471			

Применом предложеног алгоритма над репрезентативним примерима, уочена су следећа запажања:

- Предложени алгоритам је примењив како над реалним тако и над синтетичким подацима (нпр. тест пример: #8).
- Алгоритам успешно издваја координате тачака и у сложеним примерима, попут радарграма код којих:
 - су краци хиперболичних рефлексја асиметрични (нпр. тест примери: #5, #10),
 - краци хиперболичних рефлексја нису исте дужине (нпр. тест примери: #2, #5, #6, #8, #10)
 - један крак је под већим утицајем шума (нпр. тест примери: #2, #10),
 - суседне хиперболичне рефлексје код којих се краци укрштају (нпр. тест примери: #4, #8, #10).
- Развијени алгоритам представља засебну целину, што значи да се може комбиновати са било којим алгоритмом за аутоматизовано издвајање темена хиперболичних рефлексја.
- На основу издвојених координата тачака на крацима успешно се одређују финалне координате темена хиперболичних рефлексја.
- Издвојене координате тачака су се показале значајне и за елиминацију интерферираних хиперболичних рефлексја (над радарграмима без претходног филтрирања).
- Промене у параметрима аквизиције немају значајан утицај на рад предложеног алгоритма.
- На основу издвојених сетова координата тачака на крацима могу се уочити разлике у несиметричности левог и десног крака, које се могу искористити за додатну сегментацију ивичних пиксела код проналаска координата темена хиперболичних рефлексја (предложено у алгоритму за детекцију хиперболичних рефлексја применом тачкасте сегментације).
- Издвајање координата тачака врши се у блиско реалном времену.

7. Закључна разматрања

Први део дисертације бави се разматрањем карактеристика објеката подземне инфраструктуре са посебним освртом на цеви и каблове (ОПИ кружног попречног пресека). У оквиру уводног дела дисертације објашњене су и основе технологије скенирања георадаром. Потом је извршена анализа тренутних достигнућа у области поступака за аутоматизовану обраду радарграма. На основу извршене анализе, према најбољем сазнању аутора изведен је закључак да не постоји адекватан алгоритам за аутоматизовано препознавање темена хиперболичне рефлексije за случај процесирања реалних радарграма у блиско реалном времену.

У практичном делу дисертације развијена су два нова алгоритма за аутоматизовану детекцију хиперболичних рефлексija на радарграмима (*gprAPEX*, *gprCAPEX*). Циљ развијених алгоритама је добијање додатних информација о ОПИ. *gprAPEX* алгоритам користи два приступа: први је базиран на креирању *COD* детектора, а други на примени конволуционих неуронских мрежа (*CNN*). Са друге стране, *gprCAPEX* алгоритам у основи користи *Canny* детектор ивица. Надаље су детаљно анализирани сви значајни параметри аквизиције као и њихов утицај на крајњи резултат аутоматизоване обраде радарграма. Кроз поглавље 5.4.2.1 уочено је да постоје значајне разлике у вредностима интензитета рефлексиваног сигнала узрокованих различитим параметрима аквизиције. На основу ове анализе изведен је закључак да није довољна једна обука *gprAPEX* алгоритма за постизање добрих резултата детекције хиперболичних рефлексija за све типове објеката и параметара аквизиције. За аквизиционе параметре који значајно утичу на проценат рефлексije попут фреквенције антене, материјала објекта и слично потребно је креирање засебних обука. У оквиру имплементације алгоритама креиране су 42 обуке са различитим узорцима реалних и синтетичких радарграма. Број узорака у обуци вариран је од 500 до 2000.

Основни допринос дисертације огледа се у развоју два алгоритма за детекцију хиперболичних рефлексija на радарграмима у блиско реалном времену. Поред детекције хиперболичних рефлексija на радарграмима, додатни допринос дисертације представља развој новог алгоритма за издвајање координата тачака на крацима хиперболичних рефлексija, на основу којих се може вршити процена радијуса детектованог вода. Према најбољем сазнању аутора, координате тачака на крацима које користе досадашњи алгоритми се издвајају мануелно или полуаутоматски. Посебна пажња у овом делу посвећена је критеријуму заустављања алгоритма за издвајање координата тачака на крацима.

Валидација развијених алгоритама извршена је над реалним и синтетичким радарграмима различите сложености. Сви коришћени радарграми у

практичном делу дисертације представљају радарграме без претходне обраде (сирови радарграми).

На основу развијених алгоритама и спроведених анализа долази се до следећих закључака:

- Потврђене су полазне хипотезе да је могуће извршити процесирање радарграма на аутоматизован начин у блиско реалном времену.
- Најбољи резултати за детекцију хиперболичних рефлексја на радарграмима добијени су применом *gprAPEX* алгорита користећи конволуционе неуронске мреже (примена *fasterR-CNN* детектора).
- Највећи проценат успешности детекције постигнут је применом обука које садрже већи број реалних узорака.
- Фазе које се наводе у оквиру *gprCAPEX* алгорита за детекцију темена хиперболичне рефлексје у значајној мери могу да унапреде и убрзају процесирање постојећих алгоритама базираних на тачкастој сегментацији радарграма.
- Издвајање координата тачака на крацима на основу предложеног алгорита показало се успешним и над:
 - радаграмима са сложеном геометријом и диспозицијом хиперболичних рефлексја,
 - радаграмима који садрже већи проценат шума,
 - радарграмима са интерферираним рефлексјама - укрштање суседних крака хиперболичних рефлексја,
 - радраграмима са хиперболичним рефлексјама које су непотпуне или неједнаке дужине.
- Радарграми веће дужине изискују повећање времена обраде, али је оно за предложене алгоритме занемарљиво мало, нарочито ако се посматрају стандардне дужине радарграма за скенирање водова које су најчешће дужине до 5m.

Значај дисертације огледа се и у могућности унапређења применљивости постојећих алгоритама базираних на сличним процедурама, имплементацијом једног или више фаза аутоматизоване обраде радарграма описаних у практичном делу дисертације. Поред тога, сет издвојених координата тачака на крацима хиперболичних рефлексја представља улазне податке алгоритама за процену геометријских карактеристика попут пречника, али и других особина као што су: материјал (метал, неметал), стање (оштећеност, степен кородираниости, запуњеност) или намена (кабел, цев) објеката од интереса. Минималном модификацијом алгорита могуће је детектовање и објеката правоугаоног попречног пресека и екстракција њихових димензија. Такође, *gprCAPEX* алгоритам допринео је и развоју фазе која се може применити за детекцију хоризонталних слојева земљишта у радарграму, као посебној области истраживања.

7.1 Правци будућих истраживања

На основу знања, истраживања и искуства стеченог током израде ове докторске дисертације формулисани су правци будућих истраживања, који укључују неку од следећих ставки:

- Проширење обука са додатним реалним и синтетичким узорцима.
- Имплементација алгоритама кроз неки *OpenSource* програмски језик (нпр. *Python*)
- Развој специјализованих обука за детекцију:
 - неметалних водова
 - водова/каблова мањег пречника
 - водова средњих пречника (нпр. ДН200 – ДН500)
 - већих пречника (нпр. изнад ДН500)
 - хиперболичних рефлексија насталих од арматурне мреже
- Развој специјализованих обука за различите централне фреквенције антена (нпр. 200, 400 и 900MHz).
- Имплементација развијених алгоритама кроз неки од постојећих софтвера за обраду радарграма.
- Надоградња са постојећим/новим алгоритмима за естимацију радијуса детектованих водова.
- Проширење развијених алгоритама у циљу:
 - процене материјала детектованог вода,
 - класификације и издвајања слојева земљишта у радарграму.
- Креирање графичког корисничког интерфејса за развијене алгоритме.

8. Литература

- [1] *Zakon o državnom premeru i katastru i upisima prava na nepokretnostima.* [Online]. Available: http://notarಿಸrbija.rs/wp-content/uploads/2014/09/zakon_katastar_nepokretnosti.pdf, датум приступа: 25.07.2021.
- [2] *Zakon o državnom premeru i katastru*, vol. 41. [Online]. Available: www.paragraf.rs, датум приступа: 24.08.2021.
- [3] *Pravilnik o premeru i katastru vodova.* 2020. [Online]. Available: www.pravno-informacioni-sistem.rs, датум приступа: 12.07.2021.
- [4] B. Riveiro and M. Solla, “Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure,” London, 2016.
- [5] A. Benedetto and L. Pajewski, “Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar,” New Delhi, 2015. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/13593>
- [6] L. Mertens, R. Persico, L. Matera, and S. Lambot, “Automated Detection of Reflection Hyperbolas in Complex GPR Images with No A Priori Knowledge on the Medium,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 1, pp. 580–596, Jan. 2016, doi: 10.1109/TGRS.2015.2462727.
- [7] A. Ristić, M. Vrtunski, M. Govedarica, L. Pajewski, and X. Derobert, “Automated Data Extraction from Synthetic and Real Radargrams of District Heating Pipelines,” in *9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/IWAGPR.2017.7996046.
- [8] G. Terrasse, J.-M. Nicolas, E. Trouve, and E. Drouet, “Automatic localization of gas pipes from GPR imagery,” in *24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2016, pp. 2395–2399.
- [9] G. Terrasse, J. M. Nicolas, E. Trouve, and E. Drouet, “Application of the Curvelet Transform for Clutter and Noise Removal in GPR Data,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 10, pp. 4280–4294, Oct. 2017, doi: 10.1109/JSTARS.2017.2717960.
- [10] Q. Hoarau, G. Ginolhac, A. M. Atto, and J. M. Nicolas, “Robust adaptive detection of buried pipes using GPR,” *Signal Processing*, vol. 132, pp. 293–305, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.sigpro.2016.07.001.
- [11] S. Birkenfeld, “Automatic detection of reflexion hyperbolas in gpr data with neural networks,” in *World Automation Congress*, Sep. 2010, pp. 1189–1194.
- [12] A. Ristić, Ž. Bugarinović, M. Vrtunski, and M. Govedarica, “Point coordinates extraction from localized hyperbolic reflections in GPR data,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 144, pp. 1–17, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.jappgeo.2017.06.003.

- [13] Ž. Bugarinović *et al.*, “Automated data extraction from synthetic and real radargrams of complex structures,” in *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Dec. 2018, vol. 23, no. 4, pp. 407–421. doi: 10.2113/JEEG23.4.407.
- [14] A. Ristić, Ž. Bugarinović, L. Pajewski, and X. Derobert, “Verification of Algorithm for Point Extraction from Hyperbolic Reflections in GPR Data,” in *9th IEEE International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/IWAGPR.2017.7996109.
- [15] Ž. Bugarinović, L. Pajewski, A. Ristić, M. Vrtunski, M. Govedarica, and M. Borisov, “On the introduction of canny operator in an advanced imaging algorithm for real-time detection of hyperbolas in ground-penetrating radar data,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 3, pp. 1–22, Mar. 2020, doi: 10.3390/electronics9030541.
- [16] J. Begović and D. Smiljković, *Katastar zemljišta i podzemnih vodova*, Treće izdanje. Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Naučna knjiga, 1990.
- [17] D. Uzelac, *Hidromašinska oprema*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, 2019.
- [18] N. Vukotić and J. Zrnić, *Katastar vodova*. Beograd: Viša građevinsko-geodetska škola u Beogradu, 2001.
- [19] M. Miladinović, *Katastar nepokretnosti*. Beograd: Geokarta, 2004.
- [20] A. Ristić, Ž. Bugarinović, M. Vrtunski, M. Govedarica, and D. Petrovački, “Integration of modern remote sensing technologies for faster utility mapping and data extraction,” *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 1183–1198, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.030.
- [21] D. Tolmač and S. Prvulović, *Transportni sistemi*. Zrenjanin: Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički Fakultet Mihajlo Pupin, 2012.
- [22] K. Mihailović and K. Vračarić, *Geodezija 1*. Naučna knjiga, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1989.
- [23] *Pravilnik o tehničkim normativima za projektovanje i polaganje distributivnog gasovoda od polietilenskih cevi za radni pritisak do 4 bar*. [Online]. Available: <https://impcgtblog.files.wordpress.com/2016/10/pravilnik-distributivni-polietilenske-cevi.pdf>, датум приступа: 24.08.2021.
- [24] *Osnovni tehnički zahtevi za izbor i montažu energetskih kablova i kablovskog pribora u elektrodistributivnim mrežama 1kV, 10kV, 20kV, 35kV, i 110kV*. V izdanje, 2012. [Online]. Available: <https://epsdistribucija.rs/interni-standardi/preporuke/Tp03N12.pdf>, датум приступа: 29.05.2021.
- [25] J. Sporry, D. Tessema, and M. van der Meijde, “The potential of time-domain EM sounding to resolve the presence of faults or fault zones,” 2005. doi: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.13.P048>.
- [26] A. Ristić, M. Govedarica, L. Pajewski, M. Vrtunski, and Ž. Bugarinović, “Using ground penetrating radar to reveal hidden archaeology: The case

- study of the württemberg-stambol gate in belgrade (Serbia),” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 3, Feb. 2020, doi: 10.3390/s20030607.
- [27] A. Benedetto and L. Pajewski, *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Springer, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-04813-0.
- [28] J. Daniels, “Surface Penetrating Radar,” *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 165–182, 1996, doi: 10.1049/ecej:19960402.
- [29] J. Daniels, *Ground Penetrating Radar*. Encyclopedia of RF and microwave engineering, 2005.
- [30] M. Jol, *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, First edition. Elsevier, 2009.
- [31] B. Riveiro and M. Solla, *Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructure*. London: CRCPress/Balkema – Taylor & Francis Group, 2016. doi: 10.1201/b19024-1.
- [32] H. Brown and M. Woodward, “Experimentally determined radiation characteristics of conical and triangular antennas,” *RCA review*, vol. 13, no. 4, pp. 425–452, 1952.
- [33] TerraSIRch, “SIR System-3000 Manual,” 2017.
- [34] J. E. Lucius and M. H. Powers, “GPR Data Processing Computer Software for the PC,” 2002. [Online]. Available: <http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-02-0166/lib>
- [35] C. Warren, A. Giannopoulos, and I. Giannakis, “gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar,” *Computer Physics Communications*, vol. 209, pp. 163–170, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.cpc.2016.08.020.
- [36] A. Ristić, “Estimacija optimalnih vrednosti parametara podzemnih cilindričnih objekata i zemljišta korišćenjem Georadara,” Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009.
- [37] V. Pérez-Gracia, D. di Capua, R. González-Drigo, O. Caselles, L. Pujades, and V. Salinas, “GPR resolution in cultural heritage applications,” 2010. doi: 10.1109/icgpr.2010.5550199.
- [38] T. X. H. Luo, W. W. L. Lai, R. K. W. Chang, and D. Goodman, “An empirical study of GPR imaging criteria,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 165, pp. 37–48, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jappgeo.2019.04.008.
- [39] ASTM, *Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation*. 2011.
- [40] A. V. Ristic, D. Petrovacki, and M. Govedarica, “A new method to simultaneously estimate the radius of a cylindrical object and the wave propagation velocity from GPR data,” *Computers and Geosciences*, vol. 35, no. 8, pp. 1620–1630, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.cageo.2009.01.003.
- [41] J. Illingworth and J. Kittler, “A survey of the Hough transform: Computer Vision,” *Graphics and Image Processing*, vol. 44, no. 1, pp. 87–116, 1988.

- [42] P. Falorni, L. Capineri, L. Masotti, and G. Pinelli, “3-D radar imaging of buried utilities by features estimation of hyperbolic diffraction patterns in radar scans,” in *Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar*, 2004, pp. 403–406.
- [43] A. Simi, S. Bracciali, and Manacorda G., “Hough transform based automatic pipe detection for array GPR: algorithm development and on-site tests,” in *Radar Conference*, 2008, pp. 1–8. doi: 10.1109/RADAR.2008.4720763.
- [44] C. G. Windsor, L. Capineri, and P. Falorni, “The estimation of buried pipe diameters by generalized hough transform of radar data,” in *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 2005, pp. 345–349. doi: 10.2529/PIERS041117130829.
- [45] G. Borgioli, L. Capineri, P. Falorni, S. Matucci, and C. G. Windsor, “The detection of buried pipes from time-of-flight radar data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 8, pp. 2254–2266, Aug. 2008, doi: 10.1109/TGRS.2008.917211.
- [46] C. G. Windsor, L. Capineri, and P. Falorni, “A data pair-labeled generalized hough transform for radar location of buried objects,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 124–127, 2014, doi: 10.1109/LGRS.2013.2248119.
- [47] W. Li, X. Cui, L. Guo, J. Chen, X. Chen, and X. Cao, “Tree root automatic recognition in Ground penetrating radar profiles based on randomized Hough transform,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 1–16, 2016, doi: 10.3390/rs8050430.
- [48] H. Zhou, M. Tian, and X. Chen, “Feature Extraction and Classification of Echo Signal of Ground Penetrating Radar,” *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, vol. 10, no. 6, pp. 1009–1012, 2005.
- [49] A. Dell’Acqua, A. Sarti, S. Tubaro, and L. Zanzi, “Detection of linear objects in GPR data,” *Signal Processing*, vol. 84, no. 4, pp. 785–799, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.sigpro.2003.12.010.
- [50] E. Pasolli, F. Melgani, and M. Donelli, “Automatic analysis of GPR images: A pattern-recognition approach,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 7, pp. 2206–2217, Jul. 2009, doi: 10.1109/TGRS.2009.2012701.
- [51] X. Xie, H. Qin, C. Yu, and L. Liu, “An automatic recognition algorithm for GPR images of RC structure voids,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 99, pp. 125–134, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.02.016.
- [52] H.-S. Youn and C.-C. Chen, “Automatic GPR target detection and clutter reduction using neural network,” in *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Apr. 2002, vol. 4758, pp. 579–582. doi: 10.1117/12.462229.
- [53] E. Costamagna, P. Gainba, and S. Losvani, “A neural network approach to the interpretation of ground penetrating radar data,” in *IEEE International*

- Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings*, Jul. 1988, pp. 412–414. doi: 10.1109/IGARSS.1998.702923.
- [54] Z. Xiang, A. Rashidi, and G. Ou, “An Improved Convolutional Neural Network System for Automatically Detecting Rebar in GPR Data,” in *Computing in Civil Engineering*, 2019, pp. 422–429.
- [55] X. L. Travassos, S. L. Avila, and N. Ida, “Artificial Neural Networks and Machine Learning techniques applied to Ground Penetrating Radar: A review,” *Applied Computing and Informatics*, vol. 17, no. 2. Emerald Group Holdings Ltd., pp. 296–308, Apr. 29, 2021. doi: 10.1016/j.aci.2018.10.001.
- [56] R. Janning, A. Busche, T. Horváth, and L. Schmidt-Thieme, “Buried pipe localization using an iterative geometric clustering on gpr data,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 42, no. 3, pp. 403–425, Oct. 2014, doi: 10.1007/s10462-013-9410-2.
- [57] S. Shihab and W. Al-Nuaimy, “Image processing and neural network techniques for automatic detection and interpretation of ground penetrating radar data,” in *Proceedings of Sixth WSEAS International Multi-Conference on Circuits, Communications and Computer*, 2002, pp. 12–16. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/255015233>
- [58] F. Frezza, L. Pajewski, C. Ponti, G. Schettini, and N. Tedeschi, “Cylindrical-Wave Approach for electromagnetic scattering by subsurface metallic targets in a lossy medium,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 97, pp. 55–59, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.01.004.
- [59] A. Giannopoulos, “Modelling ground penetrating radar by GprMax,” *Construction and Building Materials*, vol. 19, no. 10, pp. 755–762, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.007.
- [60] W. Al-Nuaimy, Y. Huang, M. Nakhkash, M. T. C. Fang, V. T. Nguyen, and A. Eriksen, “Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 43, no. 2–4, pp. 157–165, 2000, [Online]. Available: www.elsevier.nl/locate/jappgeo
- [61] P. Gamba and S. Lossani, “Neural Detection of Pipe Signatures in Ground Penetrating Radar Images,” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 38, no. 2, pp. 790–797, 2000, doi: 10.1109/36.842008.
- [62] M. R. Shaw, S. G. Millard, T. C. K. Molyneaux, M. J. Taylor, and J. H. Bungey, “Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks,” *NDT and E International*, vol. 38, no. 3, pp. 203–212, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.ndteint.2004.06.011.
- [63] M. Rossini, “Detecting Objects Hidden in the Subsoil by a Mathematical Method,” *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 45, no. 1–3, pp. 299–307, 2003, [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/camwa
- [64] D. Ayala-Cabrera, M. Herrera, J. Izquierdo, and R. Pérez-García, “Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images,”

- Journal of Applied Geophysics*, vol. 75, no. 4, pp. 679–686, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.024.
- [65] R. Dutta, A. G. Cohn, and J. M. Muggleton, “3D mapping of buried underworld infrastructure using dynamic Bayesian network based multi-sensory image data fusion,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 92, pp. 8–19, May 2013, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.02.005.
- [66] S. Meschino, L. Pajewski, M. Pastorino, A. Randazzo, and G. Schettini, “Detection of subsurface metallic utilities by means of a SAP technique: Comparing MUSIC- and SVM-based approaches,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 97, pp. 60–68, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.01.011.
- [67] L. Pajewski and A. Giannopoulos, “Electromagnetic modelling of Ground Penetrating Radar responses to complex targets,” in *EGU General Assembly*, 2014, vol. 16. [Online]. Available: www.GPRadar.eu.
- [68] S. Meschino and L. Pajewski, “SPOT-GPR: A Freeware tool for target detection and localization in GPR data developed within the COST action TU1208,” *Journal of Telecommunications and Information Technology*, vol. 3, pp. 43–54, 2017, doi: 10.26636/jtit.2017.121017.
- [69] S. Meschino and L. Pajewski, “A practical guide on using SPOT-GPR, a freeware tool implementing a SAP-DoA technique,” *Ground Penetrating Radar*, vol. 1, no. 1, pp. 104–122, Jan. 2018, doi: 10.26376/GPR2018005.
- [70] L. Pajewski *et al.*, “Applications of Ground Penetrating Radar in Civil Engineering – COST Action TU1208,” in *IEEE 7th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, Jul. 2013, pp. 1–6. doi: 10.1109/IWAGPR.2013.6601528.
- [71] S. Birkenfeld, “Automatic detection of reflexion hyperbolas in GPR data with neural networks,” in *World Automation Congress*, 2010, pp. 1189–1194.
- [72] X. Núñez-Nieto, M. Solla, P. Gómez-Pérez, and H. Lorenzo, “GPR signal characterization for automated landmine and UXO detection based on machine learning techniques,” *Remote Sensing*, vol. 6, no. 10, pp. 9729–9748, 2014, doi: 10.3390/rs6109729.
- [73] C. Maas and J. Schmalzl, “Using pattern recognition to automatically localize reflection hyperbolas in data from ground penetrating radar,” *Computers and Geosciences*, vol. 58, no. 1, pp. 116–125, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.cageo.2013.04.012.
- [74] Y. Cui, L. Wang, and J. Xiao, “Automatic feature recognition for GPR image processing,” in *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, pp. 176–179.
- [75] U. S. Khan, W. Al-Nuaimy, and F. E. Abd El-Samie, “Detection of landmines and underground utilities from acoustic and GPR images with a cepstral approach,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 21, no. 7, pp. 731–740, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.jvcir.2010.05.007.

- [76] J. Canny, “A Computational Approach to Edge Detection,” *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 8, no. 6, pp. 679–698, Nov. 1986, doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [77] J. F. Peters, *Foundations of Computer Vision*. Springer International Publishing Switzerland, 2017.
- [78] P. Viola and M. Jones, “Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features,” in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, pp. 511–518. doi: 10.1109/CVPR.2001.990517.
- [79] N. Dalal and B. Triggs, “Histograms of Oriented Gradients for Human Detection,” in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, pp. 886–893. doi: 10.1109/CVPR.2005.177.
- [80] T. Ojala, M. Pietikainen, and T. Maenpaa, “Multiresolution Gray-Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 7, pp. 971–987, 2002, doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017623.
- [81] P. I. Wilson and J. Fernandez, “Facial feature detection using HAAR classifiers,” *Journal of Computing Sciences in Colleges*, vol. 21, no. 4, pp. 127–133, 2006.
- [82] L. van der Maaten, E. Postma, and J. van den Herik, “Dimensionality Reduction: A Comparative Review,” Tilburg, 2009. [Online]. Available: <http://www.uvt.nl/ticc>
- [83] A. Korkmaz Sevcan and H. Binol, “Classification of molecular structure images by using ANN, RF, LBP, HOG, and size reduction methods for early stomach cancer detection,” *Journal of Molecular Structure*, vol. 1156, pp. 255–263, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.molstruc.2017.11.093.
- [84] L. Wang and D.-C. He, “Texture classification using texture spectrum,” *Pattern Recognition*, vol. 23, no. 8, pp. 905–910, 1990, doi: 10.1016/0031-3203(90)90135-8.
- [85] T. Ojala, M. Pietikainen, and D. Harwood, “Performance Evaluation of Texture Measures with Classification Based on Kullback Discrimination of Distributions,” in *IEEE 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition*, 1994, pp. 582–585. doi: 10.1109/ICPR.1994.576366.
- [86] S. Prasad and K. R. Ramakrishnan, “On resampling detection and its application to detect image tampering,” in *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 2006, pp. 1325–1328. doi: 10.1109/ICME.2006.262783.
- [87] T. Ahonen, A. Hadid, and M. Pietikä, “Face Description with Local Binary Patterns: Application to Face Recognition,” *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, vol. 28, no. 12, pp. 2037–2041, 2006, doi: 10.1109/TPAMI.2006.244.

- [88] G. Ulutaş, M. Ulutaş, and V. v. Nabiyev, “Copy move forgery detection based on LBP,” in *IEEE 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2013, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIU.2013.6531569.
- [89] C. Silva, T. Bouwmans, and C. Frélicot, “An eXtended Center-Symmetric Local Binary Pattern for Background Modeling and Subtraction in Videos,” 2015. doi: 10.5220/0005266303950402.
- [90] E. Corvee and F. Bremond, “Haar like and LBP based features for face, head and people detection in video sequences,” 2011, pp. 1–10. [Online]. Available: <http://www.inria.fr/equipes/pulsar>
- [91] D. Neumann, T. Langner, F. Ulbrich, D. Spitta, and D. Goehring, “Online vehicle detection using Haar-like, LBP and HOG feature based image classifiers with stereo vision preselection,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2017, pp. 773–778. doi: 10.1109/IVS.2017.7995810.
- [92] X. Wang, T. X. Han, and S. Yan, “An HOG-LBP human detector with partial occlusion handling,” in *IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2009, pp. 32–39. doi: 10.1109/ICCV.2009.5459207.
- [93] W. S. McCulloch and W. Pitts, “A Logical Calculus of The Ideas Immanent in Nervous Activity,” *The Bulletin of Mathematical Biology*, vol. 5, pp. 115–133, 1943.
- [94] Aurélien Géron, *Mašinsko učenje: Scikit-Learn, Keras i TensorFlow; Koncepti, alati i tehnike za izgradnju inteligentnih sistema*, 2nd ed. Beograd: Mikro knjiga, 2021.
- [95] P. Kim, *Matlab deep learning with machine learning, neural networks and artificial intelligence*. Apress, 2017. doi: 10.1007/978-1-4842-2845-6.
- [96] Y. Lecun, Y. Bengio, and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol. 521, pp. 436–444, May 2015, doi: 10.1038/nature14539.
- [97] M. Arsenović and S. Sladojević, “Detekcija bolesti biljaka tehnikama dubokog učenja,” Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2020.
- [98] K. Džomba, “Konvolucijske neuronske mreže,” Zagreb, 2018. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:020017>
- [99] J. Johnson and A. Karpathy, “Convolutional Neural Networks,” 2017.
- [100] D. Yu, H. Wang, P. Chen, and Z. Wei, “Mixed pooling for convolutional neural networks,” in *International conference on rough sets and knowledge technology*, 2014, vol. 8818, pp. 364–375. doi: 10.1007/978-3-319-11740-9_34.
- [101] J. Bruna, A. Szlam, and Y. LeCun, “Signal recovery from Pooling Representations,” in *International conference on machine learning (PMLR)*, 2014, pp. 307–315.
- [102] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 37, no. 9, pp. 1904–1916, Sep. 2015, doi: 10.1109/TPAMI.2015.2389824.

- [103] M. D. Zeiler and R. Fergus, “Stochastic Pooling for Regularization of Deep Convolutional Neural Networks,” in *Machine Learning*, Jan. 2013, pp. 1–9. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1301.3557>
- [104] K. D. Sundaram, D. Siva Josthna, B. Siva Kumar, S. Mansoor Ahameed, M. R. Teja, and K. R. Prasad, “Abnormality Detection in Medical Images with Faster-RCNN Using MATLAB,” *Journal of Interdisciplinary Cycle Research*, vol. 12, no. 7, pp. 21–30, Jul. 2020.
- [105] M. Rogina, “Detekcija lica korištenjem neuronske mreže YOLO v3 tiny,” Varaždin, 2020.
- [106] R. Girshick, “Fast R-CNN,” in *IEEE International conference on computer vision (ICCV)*, 2015, pp. 1440–1448. [Online]. Available: <https://github.com/rbgirshick/>
- [107] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks,” in *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2016, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149.
- [108] S. Vijayarani and M. Vinupriya, “Performance Analysis of Canny and Sobel Edge Detection Algorithms in Image Mining,” *Intenational Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 1, no. 8, 2013, [Online]. Available: www.ijirccce.com
- [109] W. Lan, J. Dang, Y. Wang, and S. Wang, “Pedestrian detection based on YOLO network model,” in *IEEE international conference on mechatronics and automation (ICMA)*, Aug. 2018, pp. 1547–1551.
- [110] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection,” in *IEEE Conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*, 2016, pp. 779–788. [Online]. Available: <http://pjreddie.com/yolo/>
- [111] K. Simonyan and A. Zisserman, “Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition,” Sep. 2015. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1409.1556>
- [112] C. Szegedy *et al.*, “Going Deeper with Convolutions,” in *IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*, 2015, pp. 1–9.
- [113] S. Ioffe and C. Szegedy, “Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift,” in *International conference on machine learning (ICML)*, 2015, pp. 448–456.
- [114] G. Papari and N. Petkov, “Edge and line oriented contour detection: State of the art,” *Image and Vision Computing*, vol. 29, no. 2–3, pp. 79–103, 2011, doi: 10.1016/j.imavis.2010.08.009.
- [115] P. v. Arun, “A Comparative Analysis on the Applicability of Entropy in Remote Sensing,” *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 42, no. 1, pp. 217–226, Mar. 2014, doi: 10.1007/s12524-013-0304-1.

- [116] A. D. Chitra and P. Ponmuthuramalingam, "An Approach for Canny Edge Detection Algorithm on Face Recognition," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4, no. 11, 2015.
- [117] R. Sikarwar and P. Yadav, "An Approach to Face Detection and Feature Extraction using Canny Method," *International Journal of Computer Applications*, vol. 163, no. 4, 2017.
- [118] W. Gao, X. Zhang, L. Yang, and L. Huizhong, "An Improved Sobel Edge Detection," in *IEEE 3rd International conference on computer science and information technology (ICCSIT)*, 2010, pp. 67–71. doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5563693.
- [119] V. Dharampal and V. Mutneja, "Methods of Image Edge Detection: A Review," *Journal of Electrical and Electronic Systems*, vol. 4, no. 2, 2015, doi: 10.4172/2332-0796.1000150.
- [120] L. Jing, H. Peikang, W. Xiaohu, and P. Xudong, "Image edge detection based on beamlet transform," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 20, no. 1, pp. 1–5, 2009.
- [121] R. Maini and H. Aggarwal, "Study and comparison of various image edge detection techniques," *International Journal of Image processing (IJIP)*, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, 2009.
- [122] D. Marr and E. Hildreth, "Theory of edge detection," *Proceedings of the Royal Society of London - Biological Sciences*, vol. 207, no. 1167, pp. 187–217, 1980, doi: 10.1098/rspb.1980.0020.
- [123] M. Ibrahim and M. Emery, "On the application of Artificial Neural in analysing and classifying human chromosome," *Journal of Computer science*, vol. 2, no. 1, pp. 72–75, 2006.
- [124] N. Senthilkumaran and R. Rajesh, "A study on edge detection methods for image segmentation," in *Proceedings of the international Conference on Mathematics and Computer Science (ICMCS)*, 2009, pp. 255–259.
- [125] X.-B. Wen, H. Zhang, and Z.-T. Jiang, "Multiscale Unsupervised Segmentation of SAR Imagery Using the Genetic Algorithm," *Sensors*, vol. 8, no. 3, pp. 1704–1711, 2008.
- [126] N. Senthilkumaran and Rajesh R., "A study on split and merge for region based image segmentation," in *Proceedings of UGC sponsored National conference network security (NCNS)*, 2008, pp. 57–61.
- [127] D. Meghana and G. K. Andurkar, "Edge detection technique :a comparative approach," *World Journal of Science and Technology*, vol. 2, no. 4, pp. 142–145, 2012.
- [128] Indrajeet. Kumar, R. Jyoti, and H. S. Bhadauria, "A Conventional Study Of Edge Detection Technique In Digital Image Processing," *International Journal of Computer Science and Mobile Computing (IJCSMC)*, vol. 3, no. 4, pp. 328–334, 2014, [Online]. Available: www.ijcsmc.com

- [129] P. A. Khaire and N. v. Thakur, "A Fuzzy Set Approach for Edge Detection," *International Journal of Image Processing (IJIP)*, vol. 6, no. 6, pp. 403–412, 2012.
- [130] M. H. Hueckel, "An operator which locate edges in digitized pictures," *Journal of the ACM*, vol. 18, no. 1, pp. 113–125, 1971.
- [131] D. Marr and T. Poggio, "A computational theory of human stereo vision," *Proceedings of the Royal Society of London - Biological Sciences*, vol. 204, no. 1156, pp. 301–328, 1979, doi: 10.1098/rspb.1979.0029.
- [132] E. Nadernejad, S. Sharifzadeh, and H. Hassanpour, "Edge Detection Techniques: Evaluations and Comparisons," *Applied Mathematical Sciences*, vol. 2, no. 31, pp. 1507–1520, 2008.
- [133] H. Spontón and J. Cardelino, "A Review of Classic Edge Detectors," *Image Processing On Line*, vol. 5, pp. 90–123, Jun. 2015, doi: 10.5201/ipol.2015.35.
- [134] Kent. A. Stevens, "Surface perception from local analysis of texture and contour," Massachusetts Institute of Technology, 1979.
- [135] E. R. Davies, "Constraints on the design of template masks for edge detection," *Pattern Recognition Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 111–120, 1986.
- [136] A. Rosenfeld, "Computer Vision: A Source of Models for Biological Visual Processes?," *IEEE Transaction on Biomedical*, vol. 36, no. 1, pp. 83–94, 1989, doi: 10.1109/10.16452.
- [137] B. Kaur and A. Garg, "Mathematical Morphological Edge Detection For Remote Sensing Images," in *IEEE 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, 2011, pp. 324–327. doi: 10.1109/ICECTECH.2011.5942012.
- [138] R. Muthukrishnan and M. Radha, "Edge Detection Techniques For Image Segmentation," *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, vol. 3, no. 6, pp. 259–267, Dec. 2011, doi: 10.5121/ijcsit.2011.3620.
- [139] L. Mingxiu and C. Shuai, "A new prediction method for edge detection based on human visual feature," in *IEEE, 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2012, pp. 1465–1468. doi: 10.1109/CCDC.2012.6244235.
- [140] D. Adlakha, D. Adlakha, and R. Tanwar, "Analytical Comparison between Sobel and Prewitt Edge Detection Techniques," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 7, no. 1, pp. 1482–1484, 2016, [Online]. Available: <http://www.ijser.org>
- [141] S. Saluja, A. K. Singh, S. Agrawal, M. E. Scholar, I. Bhilai, and S. Asst, "A Study of Edge Detection Methods," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 994–999, 2013, [Online]. Available: www.ijarccce.com
- [142] R. Nisha Mehra and L. Sharma, "Comparative Analysis of Canny and Prewitt Edge Detection Techniques used in Image Processing," *International*

- Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 28, no. 1, 2015, [Online]. Available: <http://www.ijettjournal.org>
- [143] I. Sobel and G. Feldman, "A 3×3 isotropic gradient operator for image processing," 1973. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/285159837>
- [144] N. Rao Kunjam, S. Rao, A. Rao Appa, and R. Sridhar, "Sobel Edge Detection Method to Identify and Quantify the Risk Factors for Diabetic Foot Ulcers," *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, vol. 5, no. 1, pp. 39–46, Feb. 2013, doi: 10.5121/ijcsit.2013.5103.
- [145] R. Gonzalez C., R. Woods E., and S. Eddins L., *Digital Image Processing Using MATLAB*. Pearson Education India, 2004.
- [146] L. Roberts, "Machine perception of three-dimensional solids," Garland Publishing, New York, 1963.
- [147] T. Shrivakshan G., "A Comparison of various Edge Detection Techniques used in Image Processing," *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, no. 5, pp. 269–276, 2012.
- [148] E. Igbinosa Ireysuwa, "Comparison of Edge Detection Technique in Image Processing Techniques," *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 25–29, 2013.
- [149] S. Gupta and G. Mazumdar S., "Sobel Edge Detection Algorithm," *International Journal of Computer Science and Management Research*, vol. 2, no. 2, pp. 1578–1583, 2013.
- [150] J. Vijayakumar D. and J. Durai L., "A Review and Performance Analysis of Image Edge Detection Algorithms," *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering*, vol. 3, no. 12, pp. 397–401, 2017, [Online]. Available: <http://www.ijfrcsce.org>
- [151] G. Xin, C. Ke, and H. Xiaoguang, "An improved Canny edge detection algorithm for color image," in *IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*, 2012, pp. 113–117. doi: 10.1109/INDIN.2012.6301061.
- [152] R.-L. Hsu, M. Abdel-Mottaleb, and K. Jain A., "Face Detection in Color Images," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, pp. 696–706. doi: 10.1109/34.1000242.
- [153] Y. Mei and J. Yu, "An Algorithm for Automatic Extraction of Moving Object in the Image Guidance," in *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, 2010, vol. 1, pp. 226–230. doi: 10.1109/ISDEA.2010.253.
- [154] S. Bhadauria H., A. Singh, and A. Kumar, "Comparison between Various Edge Detection Methods on Satellite Image," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, no. 6, pp. 324–328, 2013, [Online]. Available: www.ijetae.com

- [155] A. Ristić, “Estimacija optimalnih vrednosti parametara podzemnih cilindričnih objekata i zemljišta korišćenjem Georadara,” Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009.
- [156] E. Cuevas, D. Zaldivar, and R. Rojas, “Computer Vision using MatLAB and the Toolbox of Image Processing,” 2003.
- [157] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *The finite difference time domain method for electromagnetics*. CRC press, 1993.
- [158] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*. Artech house, 2005.
- [159] M. Vrtunski, Ž. Bugarinović, L. Pajewski, A. Ristić, and M. Govedarica, “Recognition of horizontal layers in a segmented radargram after the application of Canny edge detector,” 2020. doi: 10.5194/egusphere-egu2020-7909.

9. Прилози

Прилог 1. Заглавље *.HD* фајла

Ставка #	Опис
1	<i>Trace number</i>
2	<i>Position</i>
3	<i>Number of points per trace</i>
4	<i>Topographic data, if available</i>
5	<i>(not used)</i>
6	<i># bytes/point (always 2 for Rev 3 firmware)</i>
7	<i>Trace Number</i>
8	<i># of stacks</i>
9	<i>Time window</i>
10-14	<i>Not used</i>
15	<i>Reserved for receiver x position</i>
16	<i>Reserved for receiver y position</i>
17	<i>Reserved for receiver z position</i>
18	<i>Reserved for transmitter x position</i>
19	<i>Reserved for transmitter y position</i>
20	<i>Reserved for transmitter z position</i>
21	<i>time zero adjustment</i> <i>where: point(x) = point(x + adjustment)</i>
22	<i>Zero flag: 0 = data okay, 1=zero data</i>
23	<i>(not used)</i>
24	<i>Time of day data collected in seconds past midnight</i>
25	<i>Comment flag: 1 = comment attached</i>
26-32	<i>Comment</i>

Прилог 2. Заглавље *.rad* фајла

Ставка #	Опис
1	SAMPLES: 512
2	FREQUENCY: 4871.373810
3	FREQUENCY STEPS: 1
4	SIGNAL POSITION: -0.002258
5	RAW SIGNAL POSITION: 32778
6	DISTANCE FLAG: 1
7	TIME FLAG: 0
8	PROGRAM FLAG: 0
9	EXTERNAL FLAG: 0
10	TIME INTERVAL: 0.010000
11	DISTANCE INTERVAL: 0.030000
12	OPERATOR:
13	CUSTOMER:ESSE
14	SITE:
15	ANTENNAS: 400
16	ANTENNA ORIENTATION: normal
17	ANTENNA SEPARATION: 0.600000
18	COMMENT:
19	TIMEWINDOW: 0.105104
20	STACKS: 32
21	STACK EXPONENT: 5
22	STACKING TIME: 0.163840
23	LAST TRACE: 532
24	STOP POSITION: 16.06
25	SYSTEM CALIBRATION: 0.0002052809

Прилог 3. Део функције за читавање података из заглавља *.dzt* фајла.

```
function HDR = readHeader(fid)

HDR.tag = fread(fid,1,'ushort');
if HDR.tag==hex2dec('00ff'), Number_of_headers = 1; end;
if HDR.tag==hex2dec('01ff'), Number_of_headers = 2; end;
if HDR.tag==hex2dec('02ff'), Number_of_headers = 3; end;
if HDR.tag==hex2dec('03ff'), Number_of_headers = 4; end;
HDR.Header_size = fread(fid,1,'ushort');
HDR.Samples_per_scan = fread(fid,1,'ushort');
HDR.Bits_per_word = fread(fid,1,'ushort');
HDR.Binary_offset = fread(fid,1,'short');
HDR.Scans_per_second = fread(fid,1,'float');
HDR.Scans_per_meter = fread(fid,1,'float');
HDR.Meters_per_mark = fread(fid,1,'float');
HDR.Position = fread(fid,1,'float');
HDR.Range = fread(fid,1,'float');
HDR.Scans_per_pass = fread(fid,1,'ushort');
HDR.CreateDate.sec = fread(fid,1,'ubit5')*2;
HDR.CreateDate.min = fread(fid,1,'ubit6');
HDR.CreateDate.hour = fread(fid,1,'ubit5');
HDR.CreateDate.day = fread(fid,1,'ubit5');
HDR.CreateDate.month = fread(fid,1,'ubit4');
HDR.CreateDate.year = fread(fid,1,'ubit7')+1980;
HDR.ModifyDate.sec = fread(fid,1,'ubit5');
HDR.ModifyDate.min = fread(fid,1,'ubit6');
HDR.ModifyDate.hour = fread(fid,1,'ubit5');
HDR.ModifyDate.day = fread(fid,1,'ubit5');
HDR.ModifyDate.month = fread(fid,1,'ubit4');
HDR.ModifyDate.year = fread(fid,1,'ubit7');
Offset_to_range_gain = fread(fid,1,'ushort');
Size_of_range_gain = fread(fid,1,'ushort');
Offset_to_text = fread(fid,1,'ushort');
Size_of_text = fread(fid,1,'ushort');
Offset_to_proc_hist = fread(fid,1,'ushort');
Size_of_proc_hist = fread(fid,1,'ushort');
HDR.Number_of_channels = fread(fid,1,'ushort');
HDR.Dielectric_constant = fread(fid,1,'float');

end
```

Прилог 4. Структура `.out` фајла²⁴

```
/
  rxs/
    rx1/
      Name
      Position
      Ex
      Ey
      Ez
      Hx
      Hy
      Hz
      Ix [optional]
      Iy [optional]
      Iz [optional]
    rx2/
      ...
  srcs/
    src1/
      Type
      Position
    src2/
      ...
  tls/
    t11/
      Position
      Resistance
      dl
      Vinc
      Inc
      Vtotal
      Itotal
    t12/
      ...
```

Назив пријемника
Позиција пријемника у моделу (у метрима)
Вр. x комп. ел. поља на том положају пријемника
Вр. y комп. ел. поља на том положају пријемника
Вр. z комп. ел. поља на том положају пријемника
Вр. x комп. магн. поља на том положају пријемника
Вр. y комп. магн. поља на том положају пријемника
Вр. z комп. магн. поља на том положају пријемника
Вр. x комп. јачине струје на том положају пријемника
Вр. y комп. јачине струје на том положају пријемника
Вр. z комп. јачине струје на том положају пријемника

Врста извора (нпр. *hertzian dipole*)
Позиција извора у моделу (у метрима)

Позиција извора у моделу (у метрима)
Отпор линије преноса
Просторна дискретизација линије преноса
Критична вредност напона у линији преноса
Критична вредност струје у линији преноса
Вредност укупног напона у линији преноса
Вредност укупне струје у линији преноса

²⁴ <http://docs.gprmax.com/en/latest/output.html>, [датум приступа: 25.07.2020.]

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Аутоматизовано издвајање хиперболичних рефлексија и обрада података из радарграма формираних применом георадара
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за рачунарство и аутоматику
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
1. Опис података
<i>1.1 Врста студије</i> <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> Докторска дисертација
<i>1.2 Врсте података</i> а) квантитативни ✓ б) квалитативни ✓
<i>1.3. Начин прикупљања података</i> а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____

е) текст, навести врсту Литературни извори

ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати реални радарграми, прикупљени технологијом скенирања георадаром; синтетички радарграми, генерисани *gprMax* софтверским пакетом

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Excel фајл, датотека _____

б) SPSS фајл, датотека _____

в) PDF фајл, датотека _____

г) Текст фајл, датотека _____

д) JPG фајл, датотека _____

е) Остало, датотека .mat, .dzt, .in, .out

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) број варијабли Велики број

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) Велики број

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) **не** ✓

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) временски размак измедју поновљених мера је _____

б) варијабле које се више пута мере односе се на _____

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) **Да** ✓

б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип аквизиција података георадаром; генерисање синтетичких података; оба типа података садрже по једну хиперболичну рефлексију

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип Анализа доступне литературе

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Георадар SIR3000

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не** ✓

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? _____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан при аквизицији реалних радарграма и параметрима који фигуришу код генерисања синтетичких радарграма у складу са стандардима у овој области.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података у матрицу изведена је на бази експертског знања.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у **Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.**

3.1.2. URL адреса **https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf**

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) Да ✓

б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____

в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? **Стандард који примењује Репозиторијум докторских дисертација Универзитета у Новом Саду.**

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да Не

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
 - б) Подаци су анонимизирани
 - ц) Остало, навести шта
-
-

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни ✓

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Жељко Бугариновић, zeljkob@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Жељко Бугариновић, zeljkob@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Жељко Бугариновић, zeljkob@uns.ac.rs