



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА



Развој методе за одређивање зона опасности од пожара у високорегалним складиштима

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:
др Зоран Чепић, ванр. проф.

Кандидат:
Горан Бошковић

Нови Сад, 2024. године

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Горан Бошковић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	др Зоран Чепић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Развој методе за одређивање зона опасности од пожара у високорегалним складиштима
Језик и писмо рада:	Српски (ћирилица)
Физички опис рада:	Унети број: Страница 134 Поглавља 7 Референци 105 Табела 59 Слика 32 Графикона 0 Прилога 2
Научна област:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Ужа научна област (научна дисциплина):	Инжењерство заштите на раду
Кључне речи / предметна одредница:	Зона опасности, пожар, складиште, 3D модел, вишекритеријумско одлучивање, оптимизација
Апстракт на језику рада:	<p>Имајући у виду да одређивање зона опасности од пожара у складиштима није довољно истражено, ова дисертација има за циљ да представи нови методолошки приступ у вези са поменутом проблематиком. У оквиру истраживања везаних за дисертацију развијена је нова метода која омогућава прецизно одређивање потенцијалних зона опасности од појаве пожара на брз и релативно једноставан начин. Коришћењем COPRAS методе вишекритеријумског одлучивања, одређују се тежински коефицијенти који дефинишу карактеристике материјала којима су испуњене складишне јединице и исти представљају улазне податке у процесу симулације и утврђивања потенцијалних зона опасности од пожара.</p> <p>Поред поменутих тежинских коефицијената, метода укључује параметре који се односе на структуру и распоред регала у складишту, параметре који се односе на локацију сваке од складишних јединица, као и процентуални удео складишних јединица испуњених различитим материјалима. За потребе методе развијен је математички модел за нумеричку симулацију у програмском пакету Matlab, који у односу на постојеће методе (нпр. CFD) захтева мање хардверских ресурса и</p>

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и дозвола за објављивање личних података;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају у институцији у штампаном и електронском облику и не корице се са радом.

	<p>омогућава приказ складишног простора у виду 3D модела са припадајућим зонама опасности од пожара. Ефикасност развијене методе верификована је низом нумеричких примера.</p> <p>Предности развијене методе огледају се у једноставности примене, мањем броју параметара неопходних за спровођење процеса прорачуна и симулације, једноставном аквизицијом и обрадом података, као и могућности тродимензионалног приказа зона опасности од пожара у реалном времену. Резултати добијени коришћењем развијене методе представљају добру основу у почетним фазама планирања и пројектовања складишта, дефинисања превентивних мера, конфигурисања распореда регала у објекту, као и приликом пројектовања и уградње одговарајућих система заштите од пожара и евакуације у складишту.</p> <p>Имајући у виду начин функционисања развијене методе, у оквиру дисертације је извршена надоградња тј. побољшање ефикасности исте, коришћењем два биолошки инспирисана оптимизациона алгорита. На основу спроведеног поступка оптимизације, добијена су приближна решења конфигурације складишта, са свим припадајућим параметрима, која су послужила као основ за генерисање јединственог плана складишта. Овим је потврђена једна од хипотеза дефинисаних у оквиру дисертације.</p>
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	25.04.2024.
Датум одбране: (Попуњава накнадно институција)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	<p>Председник: др Владимир Мученски, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Дејан Убавин, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Драган Адамовић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Боривој Степанов, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Члан: др Вишња Михајловић, ванредни професор, Технички факултет „Михајло Пупин“, Универзитет у Новом Саду</p> <p>Ментор: др Зоран Чепић, ванреди професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду</p>
Напомена:	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Goran Bošković
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Zoran Čepić PhD, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad
Thesis title in English:	Development of a method for determining fire hazard zones in high-bay warehouses
Language and script:	Serbian language (Cyrillic)
Physical description:	Number of: Pages 134 Chapters 7 References 105 Tables 59 Illustrations 32 Graphs 0 Appendices 2
Scientific field:	Environmental protection and occupational safety engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Occupational safety engineering
Subject, Keywords:	Danger zone, fire, warehouse, 3D model, multi-criteria decision making, optimization
Abstract in English:	<p>Considering that the determination of fire hazard zones in warehouses has not been sufficiently investigated, this dissertation aims to present a new methodological approach concerning the mentioned issue. As part of the research related to the dissertation, a new method was developed that enables the precise determination of potential fire hazard zones in a quick and relatively simple way. By using the COPRAS multi-criteria decision-making method, weighting coefficients are determined that define the characteristics of the materials used to fill the storage units and represent input data in the process of simulation and determination of potential fire hazard zones.</p> <p>In addition to the mentioned weight coefficients, the method includes parameters related to the structure and arrangement of racks in the warehouse, parameters associated with the location of each of the storage units, and the percentage of storage units filled with different materials. For the method, a mathematical model was developed for numerical simulation in the Matlab software package, which, compared to existing methods (eg CFD), requires fewer hardware resources and enables the display of the storage space in the form of a 3D model with associated fire hazard zones. The effectiveness of the</p>

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

56 – Statement on the authorship,

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

5Г – Copyright statement.

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



	<p>developed method was verified by a series of numerical examples.</p> <p>The advantages of the developed method are reflected in the simplicity of application, a smaller number of parameters necessary for carrying out the calculation and simulation process, simple data acquisition and processing, as well as the possibility of a three-dimensional display of fire hazard zones in real-time. The results obtained using the developed method represent a good basis in the initial stages of planning and designing the warehouse, defining preventive measures, configuring the arrangement of racks in the facility, as well as during the design and installation of appropriate fire protection and evacuation systems in the warehouse.</p> <p>With regard to the way the developed method functions, an upgrade was made within the dissertation, i.e. improving its efficiency, using two biologically inspired optimization algorithms. Based on the conducted optimization procedure, approximate solutions of the warehouse configuration were obtained, with all associated parameters, which served as the basis for generating a unique warehouse plan. This confirms one of the hypotheses defined in the dissertation.</p>
Date of endorsement by the scientific board:	25.04.2024.
Date of defence: (Filled in by the institution)	
Thesis defence board: (title, first name, last name, position, institution)	<p>Chair: PhD Vladimir Mučenski, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: PhD Dejan Ubavin, Full Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: PhD Dragan Adamović, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: PhD Borivoj Stepanov, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: PhD Višnja Mihajlović, Associate Professor, Technical Faculty "Mihajlo Pupin", University of Novi Sad</p> <p>Mentor: PhD Zoran Čepić, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p>
Note:	

РЕЗИМЕ

Имајући у виду да одређивање зона опасности од пожара у складиштима није довољно истражено, ова дисертација има за циљ да представи нови методолошки приступ у вези са поменутом проблематиком. У оквиру истраживања везаних за дисертацију развијена је нова метода која омогућава прецизно одређивање потенцијалних зона опасности од појаве пожара на брз и релативно једноставан начин. Коришћењем COPRAS методе вишекритеријумског одлучивања, одређују се тежински коефицијенти који дефинишу карактеристике материјала којима су испуњене складишне јединице и исти представљају улазне податке у процесу симулације и утврђивања потенцијалних зона опасности од пожара.

Поред поменутих тежинских коефицијената, метода укључује параметре који се односе на структуру и распоред регала у складишту, параметре који се односе на локацију сваке од складишних јединица, као и процентуални удео складишних јединица испуњених различитим материјалима. За потребе методе развијен је математички модел за нумеричку симулацију у програмском пакету Matlab, који у односу на постојеће методе (нпр. CFD) захтева мање хардверских ресурса и омогућава приказ складишног простора у виду 3D модела са припадајућим зонама опасности од пожара. Ефикасност развијене методе верификована је низом нумеричких примера.

Предности развијене методе огледају се у једноставности примене, мањем броју параметара неопходних за спровођење процеса прорачуна и симулације, једноставном аквизицијом и обрадом података, као и могућности тродимензионалног приказа зона опасности од појаве пожара у реалном времену. Резултати добијени коришћењем развијене методе представљају добру основу у почетним фазама планирања и пројектовања складишта, дефинисања превентивних мера, конфигурирања распореда регала у објекту, као и приликом пројектовања и уградње одговарајућих система заштите од пожара и евакуације у складишту.

Имајући у виду начин функционисања развијене методе, у оквиру дисертације је извршена надоградња тј. побољшање ефикасности исте, коришћењем два биолошки инспирисана оптимизациона алгорита. На основу спроведеног поступка оптимизације, добијена су приближна решења конфигурације складишта, са свим припадајућим параметрима, која су послужила као основ за генерисање јединственог плана складишта. Овим је потврђена једна од хипотеза дефинисаних у оквиру дисертације.

Кључне речи: Зона опасности, пожар, складиште, 3D модел, вишекритеријумско одлучивање, оптимизација

ABSTRACT

Considering that the determination of fire hazard zones in warehouses has not been sufficiently investigated, this dissertation aims to present a new methodological approach concerning the mentioned issue. As part of the research related to the dissertation, a new method was developed that enables the precise determination of potential fire hazard zones in a quick and relatively simple way. By using the COPRAS multi-criteria decision-making method, weighting coefficients are determined that define the characteristics of the materials used to fill the storage units and represent input data in the process of simulation and determination of potential fire hazard zones.

In addition to the mentioned weight coefficients, the method includes parameters related to the structure and arrangement of racks in the warehouse, parameters associated with the location of each of the storage units, and the percentage of storage units filled with different materials. For the method, a mathematical model was developed for numerical simulation in the Matlab software package, which, compared to existing methods (eg CFD), requires fewer hardware resources and enables the display of the storage space in the form of a 3D model with associated fire hazard zones. The effectiveness of the developed method was verified by a series of numerical examples.

The advantages of the developed method are reflected in the simplicity of application, a smaller number of parameters necessary for carrying out the calculation and simulation process, simple data acquisition and processing, as well as the possibility of a three-dimensional display of fire hazard zones in real-time. The results obtained using the developed method represent a good basis in the initial stages of planning and designing the warehouse, defining preventive measures, configuring the arrangement of racks in the facility, as well as during the design and installation of appropriate fire protection and evacuation systems in the warehouse.

With regard to the way the developed method functions, an upgrade was made within the dissertation, i.e. improving its efficiency, using two biologically inspired optimization algorithms. Based on the conducted optimization procedure, approximate solutions of the warehouse configuration were obtained, with all associated parameters, which served as the basis for generating a unique warehouse plan. This confirms one of the hypotheses defined in the dissertation.

Keywords: Danger zone, fire, warehouse, 3D model, multi-criteria decision making, optimization

ЗАХВАЛНОСТ

Овим путем желим да искажем искрену захвалност свом ментору, ванр. проф. др Зорану Чепићу, на неизмерној подршци и несебичној помоћи током целокупног процеса истраживања у оквиру докторске дисертације.

Захваљујем се свим члановима комисије, проф. др Владимиру Мученском, проф. др Дејану Убавину, ванр. проф. др Драгану Адамовићу, ванр. проф. др Боривоју Степанову и ванр. проф. др Вишњи Михајловић, на прихватању учешћа у комисији, и корисним саветима и сугестијама који су у значајној мери утицали на квалитет саме дисертације.

Посебну захвалност дугујем колеги Марку Тодоровићу, мастер инжењеру машинства, на несебичној помоћи од првих корака приликом дефинисања и конципирања истраживања за потребе израде дисертације.

Највећу захвалност дугујем својој супрузи Марини и сину Огњену, на разумевању, подршци и помоћи када ми је то највише требало. Зато овај рад сматрам и њиховим успехом.

"Увек изгледа немогуће док се не уради."

Нелсон Мандела

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
1.1 Предмет, проблем и циљ истраживања	3
1.2 Хипотеза, концепција и методологија истраживања	4
2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА	7
2.1 Безбедност у складиштима	7
2.2 Основни појмови о пожарима	10
2.3 Процена ризика од пожара у складиштима.....	12
3. МАТЕМАТИЧКИ И НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ПОТЕНЦИЈАЛНИХ ЗОНА ОПАСНОСТИ ОД ПОЖАРА У ВИСОКОРЕГАЛНОМ СКЛАДИШТУ.....	17
3.1 Формирање математичког модела за одређивање симулационих параметара за потребе одређивања потенцијалних зона опасности од пожара.....	19
3.1.1 Опис процедуре код COPRAS методе за вишекритеријумско одлучивање	20
3.2 Тродимензионална метода за одређивање параметара складишта.....	23
3.3 Поступак одређивања координата потенцијалних зона опасности од пожара.....	26
3.4 Нумерички примери	27
3.4.1 Одређивање симулационих параметара за случај са четири врсте материјала..	27
3.4.2 Одређивање симулационих параметара за случај са пет врста материјала	31
4. ПРИМЕНА РАЗВИЈЕНЕ МЕТОДЕ НА НАЈЧЕШЋЕ СЛУЧАЈЕВЕ КОНФИГУРАЦИЈЕ СКЛАДИШТА	36
4.1 Варијанта 1 - испуњеност складишта 100%.....	39
4.1.1 Складиште испуњено са 4 врсте материјала	39
• LAYOUT 1	39
• LAYOUT 2.....	40
4.1.2 Складиште испуњено са 5 врста материјала	41
• LAYOUT 1	42
• LAYOUT 2.....	42
4.2 Варијанта 2 - укупна испуњеност складишта 70%.....	43
4.3 Варијанта 3 - укупна испуњеност складишта 70% са са четири карактеристична распореда регала и 20 начина испуне складишних јединица у регалима	45
4.4 Варијанта 4 - укупна испуњеност складишта 50% са четири карактеристична распореда регала и 20 начина испуне складишних јединица у регалима	46
5. ОПТИМИЗАЦИЈА СКЛАДИШТА ПРИМЕНОМ ОПТИМИЗАЦИОНИХ МЕТОДА И КОРИШЋЕЊЕМ РАЗВИЈЕНОГ НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА	47
5.1 Уводне напомене	47
5.2 Појам оптимизације.....	48
5.3 Подела и развој оптимизационих алгоритама	48

5.4	Алгоритам диференцијалне еволуције (DE)	51
5.5	Алгоритам претраге и спасавања (SARO).....	55
5.6	Формулација проблема оптимизације положаја зона опасности од појаве пожара..	60
5.6.1	Анализа оптимизационог проблема.....	61
5.6.2	Пројектни параметри.....	62
5.6.3	Функција циља и ограничења.....	62
6.	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	64
6.1	Варијанта 1 - испуњеност складишта 100%.....	65
6.1.1	Складиште испуњено са 4 врста материјала.....	65
6.1.2	Складиште испуњено са 5 врста материјала.....	65
	• LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	65
	• LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	66
	• LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају горња два регала).....	67
	• LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају доња два регала)	68
	• LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	69
	• LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	70
	• LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају горња два хоризонтална регала).....	71
	• LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају вертикални и први хоризонтални регал).....	72
6.2	Варијанта 2 - укупна испуњеност складишта 70%.....	73
	• LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	73
	• LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	75
	• LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала врху) 77	
	• LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала на дну) .	79
	• LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	81
	• LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	83
	• LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	85
	• LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	87
6.3	Варијанта 3 - укупна испуњеност складишта 70%.....	88
	• LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	89
	• LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	90
	• LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају горња два регала).....	91
	• LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају доња два регала)	92
	• LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	93
	• LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	94
	• LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	95
	• LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	96
6.4	Варијанта 4 - укупна испуњеност складишта 50%.....	97
	• LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	97
	• LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	98
	• LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)	99

• LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	100
• LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала) ..	101
• LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	102
• LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала) ..	103
• LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)	104
6.5 Резултати добијени применом оптимизационих алгоритама	105
6.5.1 DE алгоритам	106
• Испуњеност складишта 70% (тежински коефицијент w_{ei})	106
• Испуњеност складишта 70% (тежински коефицијент w_{ci})	107
• Испуњеност складишта 50% (тежински коефицијент w_{ei})	108
• Испуњеност складишта 50% (тежински коефицијент w_{ci})	109
6.5.2 SARO алгоритам	110
• Испуњеност складишта 70% (тежински коефицијент w_{ei})	110
• Испуњеност складишта 70% (тежински коефицијент w_{ci})	111
• Испуњеност складишта 50% (тежински коефицијент w_{ei})	112
• Испуњеност складишта 50% (тежински коефицијент w_{ci})	113
6.5.3 Дискусија резултата добијених оптимизацијом	114
6.6 Закључне напомене уз 6. поглавље	118
7. ЗАКЉУЧАК	120
ЛИТЕРАТУРА	124
ПРИЛОЗИ	131
Прилог 1 - Matlab код методе Bošković-FHZ за прорачун зона опасности од пожара	131
Прилог 2 - Matlab код функције циља код DE и SARO оптимизационих алгоритама	134

Списак слика

Слика 1.1. Графички приказ расподеле несрећа у складиштима за 2019. годину (EUFIRESTAT пројекат)

Слика 2.1 Пример регалног (лево) и подног складишта (десно)

Слика 2.2 Приказ унутрашњости једног високорегалног складишта

Слика 2.3 Пожарни троугао

Слика 2.4 Блок дијаграм модела Бајесове мреже (BN)

Слика 2.5 Генерички модел лептир машине за процену ризика од пожара у складишту

Слика 3.1. Дијаграм тока код одређивања симулационих параметара

Слика 3.2 Шематски приказ формирања тродимензионалног модела складишта и процедуре за добијање релевантних параметара

Слика 3.3 Алгоритам за формирање листе складишних јединица (INDEX_C)

Слика 3.4 Представљање складишне јединице у виду материјалне тачке

Слика 3.5. Layout високорегалног складишта са припадајућим распоредом и материјалима (• дрво, • картон, • иверица и • PVC пластика)

Слика 3.6 Поређење добијених тежинских коефицијената w_{ei} и w_{ci} за четири врсте материјала

Слика 3.7 Layout високорегалног складишта са припадајућим распоредом и материјалима (• дрво, • картон, • иверица, • PVC и • гума)

Слика 3.8 Поређење добијених тежинских коефицијената w_{ei} и w_{ci} за пет врста материјала

Слика 4.1 Распоред у складишту за четири врсте материјала - LAYOUT 1 и LAYOUT 2 (• дрво, • картон, • иверица и • PVC пластика)

Слика 4.2 Распоред у складишту за пет врста материјала - LAYOUT 1 и LAYOUT 2 (• дрво, • картон, • иверица, • PVC пластика и • гума)

Слика 4.3 Додатни распореди у складишту (LAYOUT 3 и 4)

Слика 4.4 Случајеви испуњености складишта од 70%

Слика 4.5 Карактеристични случајеви попуњености регала складишним јединицама од 70% (20)

Слика 4.6 Карактеристични случајеви попуњености регала складишним јединицама од 50% (20)

Слика 5.1. Два типа људске претраге у операцијама претраге и спасавања

Слика 5.2 Приказ високорегалног складишта са параметрима који се оптимизују

Слика 6.1 Графички приказ складишта за Layout 1 (гума у регалима 9 и 10)

Слика 6.2 Графички приказ складишта за Layout 1 (гума у регалима 1 и 2)

Слика 6.3 Графички приказ складишта за Layout 2 (гума у регалима 9 и 10)

Слика 6.4 Графички приказ складишта за Layout 2 (гума у регалима 1 и 2)

Слика 6.5 Графички приказ складишта за Layout 3 (гума у регалима 9 и 10)

Слика 6.6 Графички приказ складишта за Layout 3 (гума у регалима 1 и 2)

Слика 6.7 Графички приказ складишта за Layout 4 (гума у регалима 9 и 10)

Слика 6.8 Графички приказ складишта за Layout 4 (гума у регалима 1 и 2)

Слика 6.9 План високорегалног складишта који је генерисан на основу резултата оптимизације

Слика 6.10 Криве конвергенције најбољег резултата добијене помоћу DE и SARO алгоритама

Списак табела

Табела 3.1 Псеудокод за одређивање координата тежишта

Табела 3.2 Улазни параметри у поступку одређивања тежинских коефицијената потребних за симулацију (4 материјала)

Табела 3.3 Иницијална матрица одлучивања (w_{ei}) - Корак 1

Табела 3.4 Нормализована матрица одлучивања (w_{ei}) - Корак 2

Табела 3.5 Тежинска нормализована матрица одлучивања (w_{ei}) - Корак 3

Табела 3.6 Резултати добијени спровођењем процедуре за одређивање тежине алтернатива у случају емисије штетних гасова (w_{ci}) - Кораци (4-6)

Табела 3.7 Резултати добијени спровођењем процедуре за одређивање тежине алтернатива у случају сагоревања (w_{ci}) - Кораци (4-6)

Табела 3.8 Подаци за прорачун Спирмановог коефицијента корелације ρ

Табела 3.9 Улазни параметри у поступку одређивања тежинских коефицијената потребних за симулацију (5 материјала)

Табела 3.10 Иницијална матрица одлучивања (w_{ei}) - Корак 1

Табела 3.11 Нормализована и тежинска нормализована матрица одлучивања (w_{ei}) - Кораци 2 и 3

Табела 3.12 Резултати добијени спровођењем процедуре за одређивање тежине алтернатива у случају емисије штетних гасова (w_{ci}) - Кораци (4-6)

Табела 3.13 Резултати добијени спровођењем процедуре за одређивање тежине алтернатива у случају сагоревања (w_{ci}) - Кораци (4-6)

Табела 4.1 Псеудокод за одређивање зона опасности од појаве пожара

Табела 4.2 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за Layout 1

Табела 4.3 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за Layout 2

Табела 5.1 Псеудокод DE алгоритма

Табела 5.2 Псеудокод SARO алгоритма

Табела 6.1 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 1 - 100%)

Табела 6.2 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 1 - 100%)

Табела 6.3 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају горња два регала (Layout 2 - 100%)

Табела 6.4 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају доња два регала (Layout 2 - 100%)

Табела 6.5 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 3 - 100%)

Табела 6.6 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 3 - 100%)

Табела 6.7 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 4 - 100%)

Табела 6.8 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 4 - 100%)

Табела 6.9 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 1 (гума у регалима 9 и 10)

Табела 6.10 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 1 (гума у регалима 1 и 2)

Табела 6.11 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 2 (гума у регалима 9 и 10)

Табела 6.12 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 2 (гума у регалима 1 и 2)

Табела 6.13 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 3 (гума у регалима 9 и 10)

Табела 6.14 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 3 (гума у регалима 1 и 2)

Табела 6.15 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 4 (гума у регалима 9 и 10)

Табела 6.16 Просторне координате потенцијалних зона опасности и растојања r за Layout 4 (гума у регалима 1 и 2)

Табела 6.17 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 1 - 70%)

Табела 6.33 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ci} и испуњеност складишта од 70% (DE)

Табела 6.34 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ci} и испуњеност складишта од 70% (DE)

Табела 6.35 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ei} и испуњеност складишта од 50% (DE)

Табела 6.36 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ci} и испуњеност складишта од 50% (DE)

Табела 6.37 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ei} и испуњеност складишта од 70% (SARO)

Табела 6.38 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ci} и испуњеност складишта од 70% (SARO)

Табела 6.39 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ei} и испуњеност складишта од 50% (SARO)

Табела 6.40 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ci} и испуњеност складишта од 50% (SARO)

Табела 6.41 Табеларни приказ решења добијених на основу DE и SARO оптимizacionих алгоритама

Листа ознака

X - Иницијална матрица одлучивања

i - укупан број алтернатива

j - укупан број критеријума

r_{ij} - Нормализована вредност матрице одлучивања

V - Тежинска нормализована матрица одлучивања

w_j - Вектор тежине

S_{+i} - Приходни (максимизирајући) критеријуми

S_{-i} - Расходни (минимизирајући) критеријуми

Q_i - Релативни тежински коефицијент алтернативе

U_i - Ранг алтернатива

w_{ei} - тежински коефицијент у вези са емисијом штетних продуката сагоревања

w_{ci} - тежински коефицијент у вези са сагоревањем

X_{ci} - X координата тежишта складишних јединица

Y_{ci} - Y координата тежишта складишних јединица

Z_{ci} - Z координате тежишта складишних јединица

X_i - Локације потенцијалне зоне опасности од пожара по X оси

Y_i - Локације потенцијалне зоне опасности од пожара по Y оси

Z_i - Локације потенцијалне зоне опасности од пожара по Z оси

R - Растојање зоне опасности од пожара у односу на нулту тачку тј. улаз/излаз

r - Полупречник зоне опасности од пожара (радијус сфере)

d - Разлика рангова (Спирманов коефицијент корелације)

ρ - Спирманов коефицијент корелације рангова



a - дужина складишта

b - ширина складишта

h - висина складишта

c - ширина коридора за пролаз и манипулацију

x_i - Циљни вектор

v_i - Донорски вектор

s - Број параметара јединке

NP - Број јединки у популацији

$itermax$ - унапред дефинисани максимални број генерација

CR - Вероватноћа укрштања

M - Меморијска матрица

C - Матрица трагова

X - Матрица положаја

SD_i - Правац потраге

M_n - положај n -тог ускладиштеног трага у меморијској матрици M

g - Вектор ограничења

EUFIRESSTAT - Акроним пројекта Европске комисије у вези са заштитом од пожара

MCDM - Метода вишекритеријумског одлучивања (Multi-Criteria Decision Making)

COG - Метода центра гравитације (Center of Gravity Method)

AS/RS - Аутоматизовани системи за складиштење и преузимање палета (Automated Storage and Retrieval Systems)

ILO - Међународна организација рада (International Labour Organization)

ЛЗО - Лична заштитна опрема

NFPA - Америчка национална асоцијација за заштиту пожара (National Fire Protection Association)

CO - Угљен-моноксид

CO₂ - Угљен-диоксид

FTA - Метода анализе стабла грешака (Fault Tree Analysis)

SPA - Метода анализе скупова парова (Set Pair Analysis)

BN - Бајесова мрежа (Bayesian network)

CFD - Метода рачунарске динамике флуида (Computational Fluid Dynamics)

FST - Теорија расплнутих скупова (Fuzzy set theory)

BT - Метода лептир машине (Bowtie method)

EFAMA - Европска асоцијација произвођача пожарних аларма

FRAME - Метода процене пожарног ризика у инжењерству

COPRAS - Метода вишекритеријумског одлучивања (COmplex PRoportional ASsessment)

INDEX_C - Листа складишних јединица са припадајућим параметрима

INDEX_R - Листа регала са припадајућим параметрима

PVC - Поливинил-хлорид (Polyvinyl chloride)

Layout - Распоред регала и транспортних средстава у складишту

GA - Генетски алгоритам (Genetic Algorithm)

SA - Алгоритам симулираног каљења (Simulated Annealing)

AA - Алгоритам мрава (Ant Algorithm)

ACO - Алгоритам оптимизације колонијом мрава (Ant Colony Optimization)

PSO - Алгоритам оптимизације ројем честица (Particle Swarm Optimization)

DE - Алгоритам диференцијалне еволуције (Differential Evolution)

FA - Алгоритам свица (Firefly Algorithm)

CS - Алгоритам кукавичје претраге (Cuckoo Search)

BA - Алгоритам слепог миша (Bat Algorithm)

SARO - Алгоритам претраге и спасавања (Search and Rescue Optimization Algorithm)

1. УВОД

Последњих година у експанзији је економија базирана на услугама, где се посебно издвајају услуге у вези са логистиком и транспортом, као кључни покретачи ланца снабдевања [1]. Важну карику у ланцу снабдевања представља складиштење производа, јер омогућава компанијама и привредним субјектима да управљају флукуацијама услед потражње на тржишту, а истовремено омогућава усклађивање понуде производа са потражњом. Како би се омогућила дистрибуција производа на глобалном нивоу и исти испоручили купцима широм света, главну окосницу у областима логистике и дистрибуције представљају високорегална складишта [2]. Због повећане потражње за простором намењеним за складиштење, расту и габарити и капацитети самих складишта. Паралелно са повећањем броја складишних јединица долази и до повећања пожарног оптерећења, чиме се повећава се осетљивост објеката према пожару.

Неколико деценија уназад, анализа и моделирање објеката за складиштење, као и логистичких центара у условима пожара, заокупља све већу пажњу како истраживача тако и инжењера који се баве пројектовањем ових објеката и система [3]. У прилог томе говори и чињеница да се услед нагле експанзије производних капацитета, интензивно развијају складишни капацитети који континуирано прате ток развоја индустријске производње.

Према актуелним подацима Европске комисије (пројекат EU Firestat), у периоду од 2019. године највише несрећа у складиштима догодило се због појаве пожара (58%), затим испуштања и пада ускладиштених производа (39%) и експлозије (3%) (видети Слику 1.1) [4]. Узимајући у обзир фреквентност, величину високорегалних складишта и количину материјала који се може складиштити, сматра се да пожари у овим објектима представљају значајан изазов у смислу безбедности и заштите од пожара.



* Подаци EUFIRESTAT пројекта

Слика 1.1. Графички приказ расподеле несрећа у складиштима за 2019. годину (EUFIRESTAT пројекат)

У циљу повећања безбедности запослених и имовине, последњих неколико деценија анализа и моделирање објеката за складиштење, као и логистичких центара у условима пожара заокупља све већу пажњу како истраживача тако и инжењера који се баве пројектовањем ових објеката и система. Пожари у складиштима, често се карактеришу као веома интензивни због високог садржаја гориве материје по јединици површине у односу на запремину објекта. У зависности од врсте складишта и гориве материје у складишту, код оваквих типова пожара се појачано емитује дим и отровни продукти сагоревања, који могу садржати и канцерогене материје, што у великој мери доприноси загађењу и огромном утицају на безбедност и здравље запослених.

Једна од најважнијих мера коју треба спровести у циљу повећања безбедности објекта са једне стране и смањењу потенцијалних ризика и опасности са друге стране, јесте правилно пројектовање и инсталација система за дојаву и гашење пожара, односно система вентилације и одвођење дима и топлоте. Правилним димензионисањем и распоређивањем поменутих противпожарних система, омогућено је брзо деловање у случају пожара, а такође и брза и безбедна евакуација људства из ватром захваћених делова складишта.

Осим познавања врста и карактеристика материјала који се складиште, неопходно је познавати и сценарије у вези са потенцијалним простирањем штетних продуката и топлоте у случају пожара, односно потенцијалним критичним местима где се може појавити пожар због могуће појаве такозваних „скривених тачака паљења“ [5]. Први разлог за појаву поменутих тачака јесте да се оне јављају на местима где пожарни системи нису правилно распоређени и не покривају довољну површину за гашење, као што су углови. Други разлог јесте неправилни распоред робе, тј. нагомилавање робе које доводи до преоптерећења складишта. Овај проблем је нарочито изражен код ускладиштења материјала који лако тињају и склони су самозапаљењу, као што су памук и други текстилни материјали.

1.1 Предмет, проблем и циљ истраживања

На основу претходно наведеног, проблем одређивања критичних локација у високорегалним складиштима, и њима коресподентним зонама опасности од појаве пожара, представља актуелан научни проблем, који ће у оквиру овог истраживања бити анализиран са аспекта моделирања и симулације уз помоћ релевантних параметара, без укључивања економских и логистичких параметара. У том циљу развијен је математички модел за нумеричку симулацију у програмском пакету Matlab, коришћењем одговарајућих улазних података. Поступак добијања улазних података у виду тежинских коефицијената реализован је коришћењем методе вишекритеријумског одлучивања за материјале у складишту. Како је за одређивање зона опасности од пожара неопходан адекватан распоред транспортних јединица и регала, за добијање правилног layout-а са припадајућим распоредом материјала, користиће се биолошки инспирисане методе оптимизације. Спровођењем оптимизационог поступка и одабиром одговарајућег распореда унутар складишта, унапредиће се постојеће процедуре и обезбедити одговарајући ниво безбедности објекта и људства.

Зоне опасности од пожара у високорегалном складишту су локације где постоји вероватноћа да ће пожар избити и одакле се лако може проширити на друге делове складишта. Одређивање кључних фактора који утичу на појаву и понашање пожара представља критичан аспект у мапирању пожара и управљању ризиком од пожара. Детаљна анализа проблема пожара у складишту и спровођење предвиђених процедура везаних за прорачун, од круцијалног су значаја за одређивање зона опасности од пожара.

Прегледом доступне литературе о пожарима у складиштима, констатовано је да је ова област недовољно истражена у сегментима одређивања оптималног распореда опреме и транспортних јединица, а све у циљу утврђивања безбедних зона за евакуацију у објектима који су пројектовани по старијим прописима и нису опремљени савременим системима за откривање и гашење пожара, као и објеката који су у процесу пројектовања или реконструкције.

Циљ докторске дисертације јесте развој методе за одређивање потенцијалних зона опасности од појаве пожара у високорегалним складиштима. Развијена метода (Bošković-FNZ) за одређивање зона опасности од појаве пожара узима у обзир конфигурацију и габарите складишта, врсту материјала који се складишти, као и параметре који се односе на понашање материјала у случају њиховог горења, при чему се поменути параметри материјала односе на процес сагоревања материјала и штетне продукте који се ослобађају

током процеса сагоревања. Коришћењем метода вишекритеријумског одлучивања (MCDM - Multicriteria decision making), омогућено је добијање тежинских коефицијената за сваки материјал који се складишти и исти ће представљати улазне податке у поступку одређивања поменуте локације у високорегалном складишту. У оквиру истраживања извршено је формирање математичког модела за нумеричку симулацију у програмском пакету Matlab.

Циљ предложеног приступа је добијање просторног тродимензионалног координатног приказа простора високорегалног складишта са сфером која представља потенцијалну зону опасности од појаве пожара. Центар сфере јесте тачка где постоји највећа вероватноћа од настанка пожара и иста може бити полазни основ приликом пројектовања складишта, система за дојаву и гашење пожара, као и израда плана евакуације из складишта. Са аспекта безбедности, коришћењем оптимизационих метода, добијена је оптимална конфигурација складишта по питању типа layout-а складишта, распореда регала, распореда материјала унутар регала, као и процентуалног садржаја материјала за сваки регал појединачно. Практична страна методе огледа се у могућности примене добијених резултата приликом санације постојећих или пројектовања нових складишта у циљу смањења потенцијалних узрока од могуће појаве пожара и повећања безбедности запослених који опслужују саме објекте. Такође, треба истаћи да ће резултати добијени применом развијене методе на одређени начин утицати и на смањење емисије токсичних гасова насталих у процесу горења, а који су потенцијално опасни по животну и радну средину.

1.2 Хипотеза, концепција и методологија истраживања

На основу постављеног циља, као основа за дефинисање плана и програма истраживања, постављене су полазне хипотезе:

Хипотеза 1: Очекује се утврђивање зависности зона опасности од пожара од распореда транспортних јединица и распореда регала у високорегалном складишту,

Хипотеза 2: Очекује се утврђивање релације између зона опасности од пожара и емисије штетних гасова, односно да иста није еквивалентна зони која је повезана са горењем материјала у складишту,

Хипотеза 3: Очекује се да се применом оптимизације може добити приближно решење високорегалног складишта са аспекта горења и са аспекта емисије штетних гасова.

На основу истраживања које је реализовано у циљу израде докторске дисертације добијени су резултати који ће имати вишеструку примену. Примарни циљ је био развој методе за одређивање зона опасности од пожара у високорегалним складиштима која може

послужити као алат у процесу планирања и пројектовања система противпожарне заштите. Резултати могу бити и полазна основа за стратешке процесе планирања и побољшања нивоа безбедности складишта и складишних система.

Докторска дисертација се састоји од седам поглавља.

У **првом поглављу** дата су уводна разматрања о примени високорегалних складишта као и проблемима везаним за безбедност самих складишта. Дат је кратак осврт на актуелно стање у вези са проценом ризика од појаве пожара и управљањем безбедношћу у складиштима. На крају поглавља, дефинисани су предмет и циљ истраживања, са акцентом на очекиване резултате спроведеног истраживања.

У **другом поглављу** дат је преглед литературе где су анализирана постојећа истраживања везана за пожаре у објектима за складиштење. Представљени су конвенционални приступи у вези са проценом ризика, али и модерне тенденције у предвиђању опасности по безбедност људства у објектима.

У **трећем поглављу** детаљно је описана метода којом се одређују потенцијалне зоне опасности од пожара, представљена кроз четири фазе: одабир кључних параметара материјала, одређивање тежинских коефицијената коришћењем MCDM методе, одређивање локацијских параметара свих складишних јединица и COG метода за одређивање потенцијалних зона опасности од пожара.

У **четвртном поглављу** развијена метода је тестирана на одговарајућим нумеричким примерима уз употребу програмског пакета Matlab. Разматрана су 4 карактеристична распореда регала у складишту (layout-a), са 4 и 5 врста материјала (дрво, картон, иверица, PVC пластика и гума), као и различите варијанте испуњености регала складишним јединицама (50%, 70% и 100%) са подједнаком заступљеношћу свих материјала од 20%. Спроведене симулације су имала двоструки циљ, валидацију математичког модела у оквиру развијене методе и верификацију прве две хипотезе у вези са утврђивањем положаја зоне опасности од пожара у зависности од конфигурације високорегалног складишта, као и потврде да положај зоне опасности од пожара коришћењем тежинских коефицијената (w_{ei}) и (w_{ci}) није еквивалентан.

У оквиру **петог поглавља** анализирана је примена оптимизационих алгоритама при одређивању потенцијалних зона опасности од појаве пожара у складиштима. Зато је на почетку истог дат кратак осврт на њихов развој и поделу. У склопу овог поглавља дат је детаљан опис DE и SARO оптимизационих алгоритама који ће бити примењени у циљу добијања приближног решења високорегалног складишта са аспекта сагоревања

материјала и са аспекта емисије штетних гасова, што је и једна од хипотеза у оквиру дисертације.

Шесто поглавље предвиђено је за резултате и дискусију, где су анализирани и међусобно поређени резултати добијени спровођењем процедуре за одређивање потенцијалних зона опасности од пожара и резултати добијени поступком оптимизације. Поређење је извршено на основу параметара који представљају крајње резултате у поступку прорачуна и симулације.

На крају, у оквиру **седмог поглавља**, дати су закључци и кратак резиме онога што је урађено у овој дисертацији. Поред тога, наведени су правци даљих истраживања и препоруке за даље унапређење математичког модела, чиме би се заокружила целина о примени методе за одређивање потенцијалних зона опасности од пожара у складиштима.

2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА

2.1 Безбедност у складиштима

Изградња и употреба централизованих дистрибутивних центара и складишта постала је логистичка стратегија у великим произвођачким и продајним системима, који често покривају широко географско подручје [3]. У данашње време се сваког дана хиљаде тона производа транспортује на релацији продавац-купац. Након што се терет од стране произвођача испоручи продавцу, исти се одређено време чува на залихама, где се чека на његову испоруку ка крајњим потрошачима. Због формирања залиха производа које настају услед просторне и временске неусклађености производње, размене и потрошње, и који се морају адекватно одложити, потребан је одређени простор за ту намену. Такав простор називамо складиште. Другим речима, складиште представља објекат или зграду у којој се складишти, прикупља и управља производима који могу бити у расутом, течном или комадном стању, и који су намењени за сопствену употребу или за даљу дистрибуцију [6].

Постоји више начина класификације и поделе складишта:

- према намени и величини,
- према техничко-експлоатационим карактеристикама,
- према начину грађења и изграђености,
- према начину чувања (физичким условима чувања) у складишту,
- према висини,
- према броју етажа.

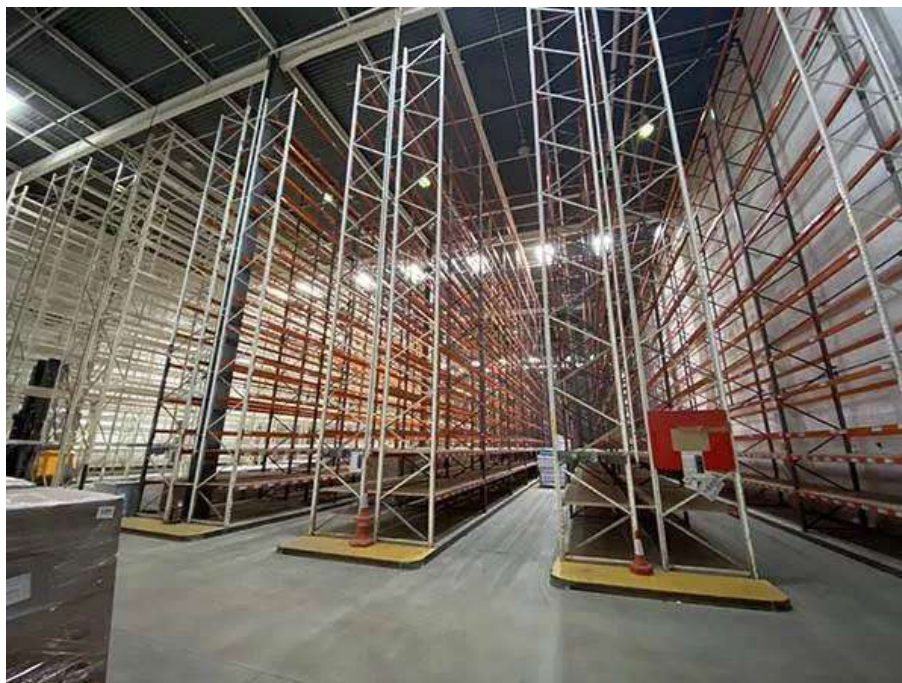
У зависности од намене, складишта се могу поделити на: складишта производног типа која служе за складиштење сировина и полупроизвода у производним објектима и дистрибутивна складишта у којима се прикупљају производи различитих произвођача који су намењени за испоруку ка већем броју крајњих купаца. Према величини складишта се могу поделити на: велика, средња и мала. Типови складишта која су најчешће у употреби јесу подна, регална и високорегална складишта. Подна и регална складишта (видети Сliku

2.1), се примењују код објеката висина до 7 m, док се код објеката за складиштење висина преко 7 m, користе високорегална складишта.



Слика 2.1 Пример регалног (лево) и подног складишта (десно)

Високорегална складишта (видети Сliku 2.2), као објекти за складиштење могу имати висину до 50 m и дужину преко 120 m. За разлику од класичних типова складишта (подно и регално), код којих је акценат на искоришћењу хоризонталног простора, у случају високорегалних складишта се користи вертикални простор за смештање и распоређивање складишних јединица, што за резултат има већу густину складиштења и боље искоришћење простора.



Слика 2.2 Приказ унутрашњости једног високорегалног складишта

Код овог типа складишта, манипулација и транспорт складишних јединица врши се уз помоћ виљушкара или специјалних аутоматизованих система за складиштење и

преузимање палета (AS/RS - Automated Storage and Retrieval Systems). Конструкција регала који се налазе унутар складишта представља истовремено носач крова и бочних зидова. Проблеми везани за високу цену грађевинског земљишта за изградњу као и захтеви за изградњу складишта са што већим капацитетом условили су развој високорегалних складишта.

Складишта као објекти у којима се реализује низ активности и радних процеса у вези са складиштењем, транспортом и манипулацијом роба и материјала, представљају места на којима се неретко могу десити различите акцидентне ситуације које за последицу могу имати повређивање запослених, настанак материјалне штете и угрожавање радне средине. У прилог томе говори и чињеница да се број незгода који догоди код активности везаних за складишне процесе креће у распону од 10-25% годишње [7].

Са становишта безбедности и здравља на раду, складишта као објекти у којима се врши одлагање различитих врста материја, могу бити веома опасна у смислу дешавања акцидената. Уколико је циљ да се у складиштима обезбеди безбедно радно окружење, важно је познавати и најчешће узроке због којих се јављају акциденти. Најчешће опасности које се јављају у складиштима су:

- опасност од пада са висине,
- опасност од повреда услед руковања или наиласка на транспортно средство,
- опасност од повреда варницом или високи напонем,
- присуство опасних материја,
- опасност од пожара и експлозија,
- опасност од урушавања објекта или полица за складиштење.

У последње време постоји све већа потреба за безбедним радним окружењем у логистици, нарочито у области складиштења где је овај захтев посебно изражен [8–10]. Због високог нивоа несрећа у складиштима, где су неке завршене фаталним исходом, неопходно је уложити одређени напор у превенцији, едукацији и повећању мотивације међу запосленима. Неке од мера које се могу спровести јесу: континуирана едукација о заштити на раду, вежбе гашења пожара са обученим стручним лицима, опремање магацинске инфраструктуре одговарајућим приручним средствима, постављање јасне сигнализације и обележавања путева за евакуацију, постављање упутстава за безбедан рад на радном месту, као и употреба одговарајуће радне одеће и личне заштитне опреме (ЛЗО) [11]. Такође, из перспективе безбедности на раду и поузданости складишних објеката морају се идентификовати и елиминисати сви потенцијални ризици који би могли довести до опасности по људство и имовину [12].

2.2 Основни појмови о пожарима

Под појмом пожара подразумева се неконтролисано горење које наноси материјалну штету или угрожава људске животе [13].

Развој пожара унутар неког простора може се поделити у три фазе [14]:

- *Почетна фаза* - одликују је мали степен сагоревања, ниска температура и споро ширење ватре. Време трајања ове фазе није строго одређено јер директно зависи од врсте материје која гори. У овој фази је могућа локализација пожара уз помоћ преносних апарата за гашење пожара.
- *Разбуктала фаза* - разликује се од почетне фазе по томе што је интензитет сагоревања највећи. У овој фази најчешће долази до рушења носеће конструкције објекта, а некада и целог објекта. Локализација пожара у овој фази је отежана, па је за гашење потребно више људства и средстава за гашење пожара.
- *Фаза живог згаришта* - представља фазу у којој не постоје услови за стварање нових жаришта ватре, јер је главни део гориве материје изгорео. У овој фази се интензитет сагоревања постепено смањује, температура горења опада и пожар се гаси.

Пожар представља комплексну физичко-хемијску појаву чију основу чини нестационарни процес горења који се одвија у одређеном простору и времену, а за чији је настанак потребно испунити следеће услове који су приказани на Слици 2.3 [15]:

- присуство гориве материје,
- непрекидни доток кисеоника у зону пожара, и
- извор паљења, као потребна енергија за настајање пожара.



Слика 2.3 Пожарни троугао

Укидањем једног од горе наведених услова, процес горења не може да отпочне. Извор паљења има функцију да иницира пожарни процес тј. да покрене механизам реакције

горења, чију улогу преузима топлота која је последица сагоревања гориве материје. Процес сагоревања се може зауставити елиминисањем гориве материје, спречавањем дотока кисеоника у зону пожара, хлађењем гориве материје испод температуре запаљивости или прекидањем ланца горења додавањем одређених супстанци у пламен - антикаталитички ефекат [16]. Под заштитом од пожара подразумева се скуп одређених активности са циљем смањења вероватноће настанка пожара, као и брзу и ефикасну локализацију и спровођење свих прописаних мера уколико дође до истог [13]. Уопштено, сви системи, опрема и прописане мере противпожарне заштите имају за циљ спречавање појаве пожара, или бар смањење вероватноће појаве самог акцидента, односно минимизацију последица у случају његове појаве.

Пожари који се дешавају у затвореном простору, имају низ одређених специфичности, па их је неопходно посебно разматрати. Из тог разлога се индустријски пожари, посебно пожари у складиштима и складишним системима, често карактеришу као веома интензивни због високог садржаја гориве материје по јединици површине у односу на запремину објекта. Неки од главних узрока за настанак пожара у складиштима, од којих су неки предвидљиви, а други нису су:

- намерно подметнути пожари
- опрема за грејање објеката,
- проблеми са електричним инсталацијама и расветом
- цигарете и опушци од цигарета,
- складиштење материјала склоних самозапаљењу.

Доказано је да пожари и велика оштећења у складиштима настају и услед следећих фактора [17]:

- касно откривање пожара,
- брзо ширење ватре,
- недостатак преграда за раздвајање на пожарне секторе,
- лоше одржавање објекта,
- диспропорција у количини ускладиштене робе (однос лако запаљива роба/теже запаљива роба),
- појава високог нивоа запаљивих и експлозивних испарења и гасова,
- недостатак стабилних система за дојаву и гашење пожара,
- неисправност стабилних система за дојаву и гашење пожара и хидрантске мреже,
- неисправност система за одвођење дима и топлоте,
- непостојање адекватног система за евакуацију.

2.3 Процена ризика од пожара у складиштима

Пожар представља озбиљну претњу са аспекта безбедности људи и имовине без обзира да ли је реч о стамбеним објектима, складишним објектима или индустријским постројењима, па самим тим управљање ризиком од избијања пожара представља велики изазов у урбаним и руралним срединама [18]. Складишта као објекти у којима се реализује низ активности и радних процеса у вези са складиштењем, транспортом и манипулацијом роба и материјала, представљају места на којим се неретко могу десити различите акцидентне ситуације које за последицу могу имати повређивање запослених, настанак материјалне штете и угрожавање радне средине, нарочито у случајевима када дође до појаве пожара. У поређењу са другим местима настанка пожара, пожари настали у складиштима чине мали удео у укупном броју пожара, али по питању ослобађања топлоте, величине површине која је захваћена пожаром, степеном оштећења самог објекта и материјалне штете, ови пожари остављају значајне последице у односу на пожаре на другим типовима објеката [19].

Као што је у претходном одељку наведено, употреба централизованих дистрибутивних система у виду високорегалних складишта све је више заступљена од стране великих дистрибутивних и продајних ланаца. Складишта су као саставни део логистике често изложена различитим побољшањима и корекцијама у фази развоја, а све у циљу постизања бољих перформанси, већег капацитета и ефикасности истих. Наведена побољшања за последицу имају већа и виша складишта, употребу аутоматизованих система за складиштење и преузимање складишних јединица (AS/RS системи), повећану густину складиштења и смештање складишних јединица на веће висине. Наведена побољшања учинила су складишта ефикасним, али истовремено су уведене и потенцијалне опасности по питању заштите од пожара. Порастом висине и густине складиштења повећана је и могућност ширења и раста пламена у случају пожара, а самим тим и смањила могућност брзе детекције и локализације пожара. Такође, повећана је емисија дима и штетних материја што значајно утиче на здравље и безбедност запослених. Распоред складишних јединица у оваквим врстама објеката не дозвољава ручно гашење пожара и због тога је потребно инсталирати аутоматске системе за гашење и дојаву, јер је у супротном, пожар у раним фазама развоја веома тешко или скоро немогуће угасити.

У савременом друштву сведоци смо пожара који се дешавају у складиштима и у којима неретко има људских жртава и великих материјалних губитака. Познато је да је већина смртних исхода у пожарима последица удисања отровних гасова (CO, CO₂,...), густог дима и недовољне количине кисеоника [21,22].

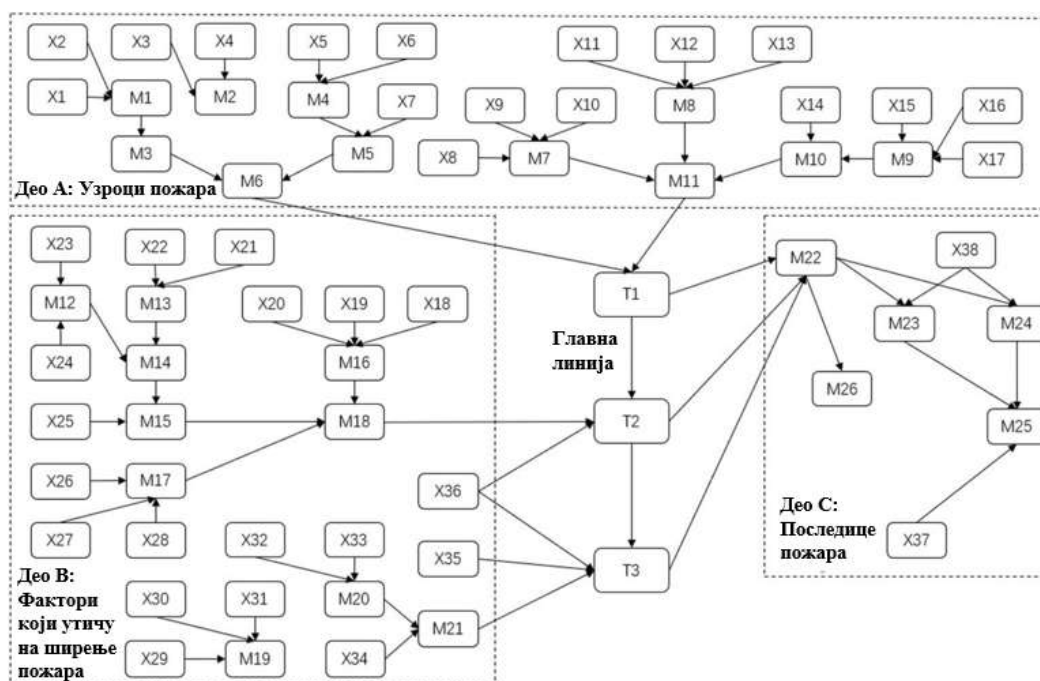
Пожар који се августа 2015. године догодио у складишту луке Тјанђин у Северној Кини, због великог броја жртава и причињене материјалне штете, указао је на значај питања заштите од пожара у складиштима. У овом догађају страдало је 173 људи, а више стотина је повређено [23]. Према спроведеним истраживањима узрок несреће је неправилно складиштење материјала склоних експлозији (нитроцелулоза) са 40 других запаљивих и експлозивних материјала (на пример, рафинисани нафтален, натријум сулфид, фурфурил алкохол, амонијум нитрат, и др). Још један пожар са катастрофалним последицама, десио се августа 2020. године у складишту луке у Бејруту (Либан) [24]. У овом пожару, погинуле су 203 особе, повређено је више од 7000, а без домова остало је више од 300.000 особа. На основу спроведене истраге, товар од 2.750 тона амонијум нитрата је 6 година био неадекватно ускладиштен без примене одговарајућих мера безбедности и заштите од пожара. Године 2021. у пожару који се догодио у логистичком складишту лоцираном у Чангчуну [25], главном граду североисточне провинције Ђилин (Кина), погинуло је најмање четрнаест људи, а дванаест је тешко повређено. У великом пожару који се 2022. године догодио у контејнерском складишту у близини лучког града на југоистоку Бангладеша [26] погинуло је најмање 49 особа, укључујући девет ватрогасаца, а укупно је повређено више од 100 особа. Узрок овако великог пожара је експлозија контејнера који је био пун хемикалија.

Према истраживањима које је Национална асоцијација за заштиту пожара (NFPA - National Fire Protection Association) објавила у 2022. години [27], просечан број пожара који се десио у складиштима у САД-у на годишњем нивоу био је 1450, у периоду између 2016. и 2020. године, а процењено је да је просечно најмање двоје људи страдало, 16 повређено и генерисано 283 милиона долара директне имовинске штете.

На основу великог броја пожара у складиштима, који се по свом обиму и последицама некада могу сматрати катастрофалним и који су се широм света догодили крајем прошлог и током овог века, покренут је велики број истраживања везан за ову тему. Примарни циљ истраживања састојао се у одговорима на питања везаним за процену ризика, безбедну евакуацију из складишта, ефикасно гашење и локализацију пожара, као и смањење опасности од појаве самог пожара. У литератури су разматрани пожари различитих горивих материја у складиштима, укључујући пожаре запаљивих течности [28], пожар у складишту хемикалија [29], пожар у складишту и индустрији памука [30], фабрици и складишту литијум-јонских батерија [31] у којима је на различите начине спроведена анализа ризика од пожара.

У раду [32] разматрано је увођење процедуре базиране на анализи скупова парова (SPA - Set Pair Analysis) која је заснована на методи анализе стабла грешака (FTA - Fault Tree Analysis), те је процена ризика од пожара за складиште хемикалија урађена применом Бајесове мреже (BN) и рачунарске динамике флуида (CFD). У раду је такође примењена и

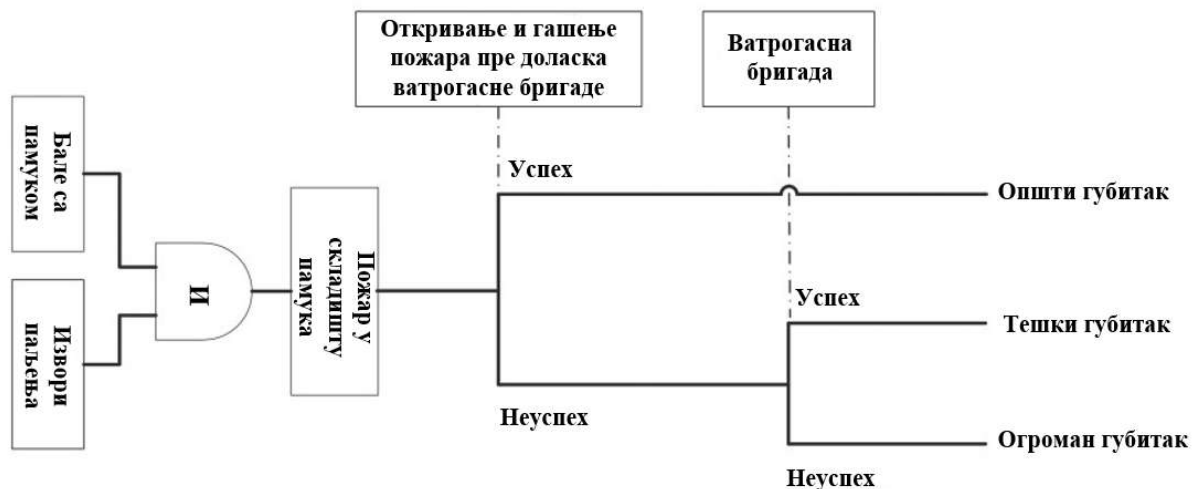
методологија која представља комбинацију методе лептир машине (BT), Теорију расплнутих скупова (FST) и Бајесову мрежу (BN). FST је коришћен за процену вероватноће појаве основних догађаја (BE), а вероватноћа интеракције између скупа варијабли добијена је коришћењем BN. У раду [33] представљена је методологија процене ризика у складишту хемикалија коришћењем Бајесове мреже (BN), рачунарске динамике флуида (CFD), лептир машине (BT) и теорије расплнутих скупова (FST) у циљу анализе последица и динамичке процене ризика (видети Сliku 2.4). Кориштећи сличан приступ, у раду [34] је извршена процена ризика од пожара у складишту литијум-јонских батерија са циљем анализе развоја пожара и последица пожара. Резултати ове процедуре су показали да је најчешће људски фактор узрок изазивања пожара у оваквом типу складишта.



Слика 2.4 Блок дијаграм модела Бајесове мреже (BN) [34]

Као главна претња имовини и сигурности људи у складишту материјала у процесним постројењима, као и у другим индустријским секторима, пожар, а такође и управљање ризиком од пожара у складишту материјала представљају изазов због потенцијалних узрока несрећа и различитих сигурносних мера [30]. Сложени узроци несрећа, тешке последице и ефикасне мере безбедности биле су главна окупација индустријских компанија и истраживача. Међутим, за пожаре у складиштима не постоји општи модел управљања ризиком. Метода лептир машине (BT) је ефикасна за откривање узрочних веза узрока несреће, сигурносних баријера и могућих последица несреће. У овој студији [30], успостављен је генерички оквир за квантитативно управљање ризиком од пожара у складишту анализом претходних пожара (види Сliku 2.5). Представљене су одговарајуће

мере безбедности, истражена је њихова расподела и ефикасност у циљу смањења ризика од пожара у складишту. Генерички оквир успостављен у овој студији може се прилагодити различитим пожарним несрећама у складишту са ограниченим манипулацијама; такође, расподелом и применом одговарајућих мера безбедности може се значајно смањити ризик од пожара у складишту.



Слика 2.5 Генерички модел лептир машине за процену ризика од пожара у складишту [30]

Прва метода за процену ризика од пожара настала је шездесетих година прошлог века, на основу истраживања швајцарског инжењера Макса Гретенера [35]. На основу добијених резултата, Гретенер је дефинисао поступак за процену ризика од пожара и дао препоруке за увођење минималних превентивних мера заштите од пожара, зависно од нивоа пожарног ризика. Швајцарско удружење инжењера и архитеката је са Швајцарским удружењем осигуравајућих компанија модификовало и стандардизовало методу по називом SIA 81, која се обично назива Гретенеров поступак или метода. Неколико деценија касније, тачније 2007. године, појавила се нова и унапређена верзија ове методе под називом SIA 2007. Гретенерову методу је у два наврата, 1975. и 1987. године, стандардизовао и Аустријски ватрогасни савез под називом Техничка препорука TRVB 100 [36]. Европска асоцијација произвођача пожарних аларма (EFAMA) је за своје потребе увела одређену модификацију у методи TRVB 100, која се по прорачунској процедури битно разликује од претходне, и ову верзију методе назвала EUROALARM-ов поступак [37]. У Белгији је 1988. године развијена четврта модификација Гретенерове методе, познатија под називом FRAME (Метода процене пожарног ризика у инжењерству), чије су две унапређене верзије развијене 1999. и 2008. године [38]. Последња верзија методе FRAME је усклађена са методологијом на којој се базирају Европске норме везане за безбедност машина.

Постојеће методе за процену ризика и даље представљају ефикасан алат за процену, смањење и отклањање свих опасности по живот и здравље људи, као и ризик од оштећења објеката. Међу методама које се примењују у процени ризика од пожара и која се издваја по једноставности примене, истиче се метода Gustav-Purt, развијена 1972. године [39]. Поменута метода није сасвим подесна за процену динамичког ризика од избијања пожара, али због својих релативно добрих особина, једноставне употребе и резултата и даље има значајну примену [40,41].

У циљу добијања поузданије методе за процену ризика од пожара у логистичким објектима, аутори рада [5] су постојећу Gustav-Purt методу унапредили преображавањем раванског модела у стереоскопски тродимензионални модел. Наведено побољшање методе чини исту погодном за анализу различитих типова складишта, а добијени резултати показују изводљивост и практичност модела. У оквиру ове унапређене методе, дефинисани су динамички фактори који су коришћени у прорачуну пожарног ризика и који се могу сврстати у неколико група као што су фактори везани за сагоревање, пожарно оптерећење, температуру, изворе паљења, фактори везани за здравље људи и др.

Основни циљ истраживања обухваћеног овом дисертацијом је развој методе за одређивање потенцијалне зоне опасности од појаве пожара у високорегалним складиштима. У поређењу са постојећим методама и приступима у домену безбедности и процене вероватноће појаве пожара у складиштима, развијена метода омогућава прецизно одређивање зоне где постоји вероватноћа појаве пожара коришћењем тежинских коефицијената добијених на основу карактеристика материјала који је ускладиштен. Применом методе вишекритеријумског одлучивања добијају се тежински коефицијенти за сваки материјал који се складишти, а исти представљају улазне податке у поступку одређивања поменуте локације у високорегалном складишту. У односу на методе са дводимензионалним приказом, у предложеном приступу се добија тродимензионални координатни приказ простора високорегалног складишта са потенцијалном зоном опасности од појаве пожара која је представљена у виду сфере са припадајућим центром. Такође, развијена метода захтева мање временских и хардверских ресурса у односу на све популарнију и софистицирану CFD методу [42–44].

3. МАТЕМАТИЧКИ И НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ПОТЕНЦИЈАЛНИХ ЗОНА ОПАСНОСТИ ОД ПОЖАРА У ВИСОКОРЕГАЛНОМ СКЛАДИШТУ

Као што је већ поменуто, пожар представља процес неконтролисаног сагоревања, чијим се одвијањем угрожавају животи и здравље људи, материјална добра и животна средина [13]. Сходно томе, од суштинског је значаја управљање пожарном безбедношћу како би се обезбедило да не дође до појаве пожара. Уколико се пожар неким случајем и догоди, важно је да исти буде брзо и ефикасно саниран и стављен под контролу, као и да се у таквим ситуацијама обезбеди брза и лака евакуација из објекта захваћеног пожаром [3]. Због природе посла који се одвија унутар објеката, складишта и складишни системи имају повећан ризик од појаве пожара. Од велике важности је да се у оваквим радним окружењима спроведе тачна, ажурна и детаљна анализа свих потенцијалних опасности у вези са пожаром у циљу обезбеђивања повећаног степена безбедности и како би се сви потенцијални узроци који могу довести до појаве пожара, свели на што је могуће мању меру.

Потенцијалне опасности које у складиштима могу изазвати пожар јесу експлозија, деформације и рушење конструкције објеката, а као последица се могу јавити директна материјална штета, повреде људства са трајним последицама, тровање услед удисања продуката сагоревања, повреде које се јављају услед панике и на крају, као најгори сценарио, губитак људских живота. Пожари у складиштима такође могу представљати и праву еколошку катастрофу, без обзира да ли су исти изазвани техничким околностима или људским активностима у току рада и манипулације.

У вези са претходно наведеним, важно је предвидети факторе који се односе на настанак и понашање пожара као критичне аспекте везане за одређивање потенцијалних зона опасности од појаве пожара. Зоне опасности од пожара у складиштима представљају

локације где постоји вероватноћа избијања пожара и одакле се исти лако може проширити на друге делове објекта.

У савременом друштву, модерни логистички објекти у виду високорегалних складишта играју веома важну улогу у ланцу складиштења и дистрибуције производа. Складишта су се деценијама уназад значајно развијала са аспекта искоришћења простора унутар објеката, повећањем степена ефикасности и порастом висине на којој се складишне јединице смештају. Наведена унапређења истовремено представљају значајан изазов по питању безбедности од пожара. Повећањем удела запаљивих материјала, истовремено се повећава и пожарно оптерећење складишта, што у случају пожара може довести до брзог ширења ватре и велике емисије продуката сагоревања. Иако је овај логистички приступ пружио бројне погодности са економског и логистичког аспекта, са друге стране условио је и повећање осетљивости складишта по питању пожарне безбедности.

Индустријски објекти и складишта у којима се смешта велики број складишних јединица, морају по важећим прописима бити опремљени системима за дојаву и гашење пожара. Данас постоји значајан број објеката у којима не постоје овакви системи заштите од пожара или су овакви системи уграђени одавно и упитно је њихово стање исправности. Распоред складишних јединица код оваквих типова објеката не омогућава лако гашење пожара уз помоћ ручних апарата, па је самим тим и стављање пожара под контролу у његовим почетним фазама горења тешко, а понекада због интензитета самог пожара и немогуће. У оваквим ситуацијама је неопходно урадити процену и анализу свих потенцијалних опасности и одредити све потенцијалне локације где може доћи до пожара. Ово поглавље састоји се из четири дела, у оквиру којих је описана развијена Bošković-FHZ метода. У првом делу поглавља представљен је математички модел са одређивање улазних параметара неопходних за нумеричку симулацију [45,46]. У оквиру другог дела представљена је COPRAS метода за избор алтернатива (улазних параметара). Улазни параметри су везани за материјале који се смештају у складиште и одговарајуће критеријуме, и омогућавају одређивање тежинских коефицијената који су меродавни за даљи прорачун и рангирање алтернатива [47]. У трећем делу су описане карактеристике и предности тродимензионалне методе за одређивање параметара везаних за садржај у складишту а који су потребни за прорачуне и одређивање зона опасности од појаве пожара. У четвртом делу описана је COG метода (Center of Gravity Method) која омогућава да се на основу координата свих складишних јединица којима је складиште испуњено и добијених улазних параметара одреде локације које представљају потенцијалне зоне опасности од појаве пожара у складишту.

3.1 Формирање математичког модела за одређивање симулационих параметара за потребе одређивања потенцијалних зона опасности од пожара

Одређивање потенцијалних зона опасности од пожара представља веома комплексан задатак [48]. У самом поступку одређивања зона опасности, потенцијални сценарији у виду улазних тј. симулационих параметара представљају кључне елементе на којима се заснива целокупна процедура. Одређивање симулационих параметара од суштинског је значаја у постизању што релевантнијих резултата симулације и идентификацији потенцијалних стратегија заштите од пожара и мера за смањење вероватноће од појаве пожара [19]. Процедура за одређивање симулационих параметара представљена је у облику дијаграма тока приказаног на Слици 3.1.



Слика 3.1. Дијаграм тока код одређивања симулационих параметара [19]

У првом кораку (Сл. 3.1) врши се дефинисање стратегије за израчунавање симулационих параметара. Математички модел за прорачун симулационих параметара узима у обзир следећих 7 улазних параметара:

1. концентрација CO [mg/g],
2. концентрација CO₂ [mg/g],
3. густина дима [kg/m³],
4. температура паљења [°C],
5. топлотна проводљивост [W/mK],
6. специфични топлотни капацитет [J/(kg K)],
7. калоријска вредност [MJ/kg].

На основу улазних параметара у оквиру корака 2, применом поступка вишекритеријумског одлучивања - MCDM (корак 3), врши се прорачун тежинских коефицијената за одређене врсте материјала који се складиште и исти представљају улазне параметре у поступку симулације. У новијој литератури, различите методе и технике одлучивања са више критеријума (Multi-Criteria Decision Making - MCDM) постале су популарне као ефикасан алат за оптимизацију са више циљева као и за идентификацију погодних параметарских комбинација на основу задатих улазних података [49].

У кораку број 4 врши се провера услова да ли је сума свих добијених тежинских коефицијената једнака јединици, тј. да ли збир процентуалних удела свих материјала који се складиште износи 100%. Као излаз на основу корака 5, добијају се тежински коефицијенти који представљају симулационе параметре код даљег прорачуна.

3.1.1 Опис процедуре код COPRAS методе за вишекритеријумско одлучивање

Методе вишекритеријумског одлучивања (MCDM), које су у последњих 20 година доживеле своју експанзију, заснивају се на принципу предлагања најбољег алтернативног решења међу алтернативама под одређеним критеријумима. Проучавањем доступне литературе из области вишекритеријумског одлучивања, за потребе одређивања симулационих параметара одабрана је COPRAS метода.

COPRAS метода (COmplex PROportional Assessment) развијена од стране Zavadskas и Kaklauskas [50] представља широко применљиву технику вишекритеријумског одлучивања чије су главне одлике једноставност и флексибилност за анализу низа скупова података. Поменута метода има веома широку област примене, коришћена је за процену ризика у грађевинској индустрији [51], при избору материјала за соларне панеле [52], за избор

машинске обраде композитних материјала [53], у рангирању ефективних ризика на пројектима снабдевања природним гасом [54], при избору врсте роботизације у производњи [55], итд. COPRAS метода омогућава решавање сложених проблема, укључује могућност коришћења већег броја алтернатива и критеријума и целокупна процедура прорачуна се може лако аутоматизовати коришћењем различитих програмских језика или софтвера.

COPRAS метода укључује неколико корака:

Корак 1 - Креирање иницијалне матрице одлучивања

У процесу вишекритеријумског одлучивања, критеријуми обично имају различите јединице мере. У циљу трансформације перформанси разматраних алтернатива у бездимензионе параметре, врши се поступак нормализације приказан у оквиру Једначине 3.1. Почетна матрица садржи улазне податке у вези са i -тим критеријумима и j -том алтернативом

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{21} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (3.1)$$

где су са $i=1, 2, \dots, m$ означени критеријуми, а са $j=1, 2, \dots, n$ алтернативе.

Корак 2 - Нормализација матрице одлучивања

Нормализација вредности елемената матрице одлучивања у циљу уклањања димензионалности врши се линеарном трансформацијом са математичким обликом датим у облику Једначине 3.2.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, n \quad (3.2)$$

где је: x_{ij} – перформанса i -те алтернативе у односу на j -ти критеријум; m – број алтернатива; n – број критеријума.

Корак 3 - Формирање тежинске нормализоване матрице одлучивања $V = [V_{ij}]_{m \times n}$

Вектор тежине који показује ниво преференције је означен вектором тежине представљеним у једначини (3.3)

$$w_j = [w_1 \dots w_n], \text{ где је } \sum_{i=1}^n (w_1 \dots w_n) = 1 \quad (3.3)$$

Тежински нормализована вредност матрице одлучивања V_{ij} израчунава се коришћењем вектора тежине и нормализоване матрице одлучивања, коришћењем једначине (3.4):

$$V_{ij} = w_j \times r_{ij}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

Корак 4 - Сума тежински нормализованих вредности критеријума V_{ij}

У овом кораку критеријуме је потребно категорисати на корисне или некорисне критеријуме са циљем да се максимизирају сви они критеријуми који су корисни, а минимизирају сви они који се сматрају некорисним. У циљу лакшег израчунавања приходних S_{+i} (максимизирајућих) индекса и расходних S_{-i} (минимизирајућих) индекса, у матрици одлучивања прво се смештају приходни, а онда расходни критеријуми, те се S_{+i} и S_{-i} рачунају коришћењем израза (3.5) и (3.6):

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n V_{ij} \mid j \in J^{\max}, i = 1, \dots, m \quad (3.5)$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^n V_{ij} \mid j \in J^{\min}, i = 1, \dots, m \quad (3.6)$$

Корак 5 – Одређивање релативног значаја (тежине) за сваку алтернативу

Релативни значај помаже да се упореде различите алтернативе путем генерализоване метрике. Може се израчунати према следећој формули:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-\min} \sum_{j=1}^n S_{-i}}{S_{-i} \sum_{j=1}^n (S_{-\min} / S_{-i})}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.7)$$

где је $S_{-\min}$ минимална вредност S_{-i} .

Корак 6 – Рангирање алтернатива

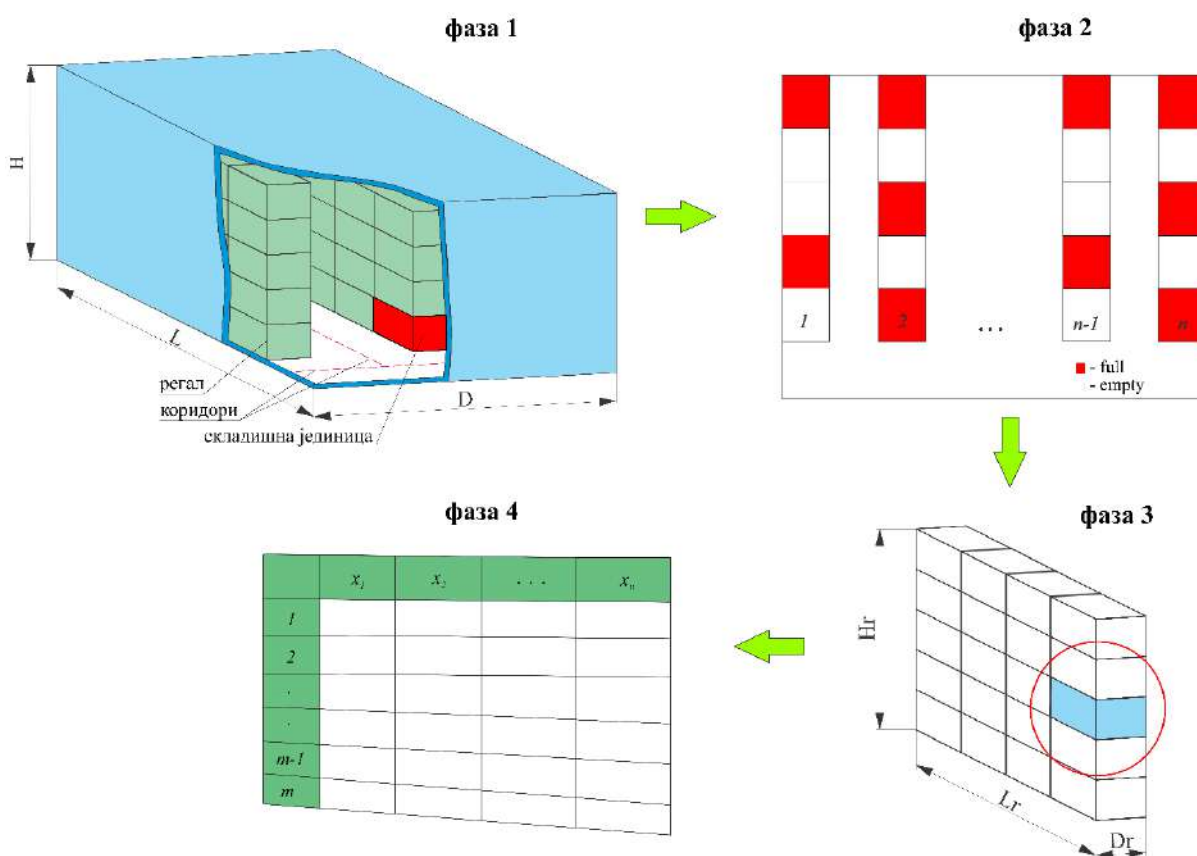
Разматране алтернативе се рангирају у растућем редоследу, према вредности Q_i , а најбоља алтернатива одређује се коришћењем формуле (3.8):

$$U_i = \left[\frac{Q_i}{Q_{\max}} \right] \times 100\% \quad (3.8)$$

Што је вредност U_i [%] већа, боља је алтернатива.

3.2 Тродимензионална метода за одређивање параметара складишта

За потребе одређивања што прецизнијих параметара везаних за локације складишних јединица, флексибилности по питању конфигурације распореда унутар самог објекта и коришћењем приступа као у радовима [6,56], развијен је поступак за формирање тродимензионалног модела складишта са припадајућим елементима. Наведени поступак има за циљ спровођење различитих процедура везаних за прорачун параметара који се користе код методе одређивања зона опасности од пожара у објекту, као у раду [19]. Предложена структура поступка за одређивање параметара високорегалног складишта који су директно повезани са припадајућом конфигурацијом регала и распоредом складишних јединица (видети Сliku 3.2) укључује четири главне фазе за прорачун и одређивање потребних параметара везаних за складиштење материјала унутар складишта.



Слика 3.2 Шематски приказ формирања тродимензионалног модела складишта и процедуре за добијање релевантних параметара [19]

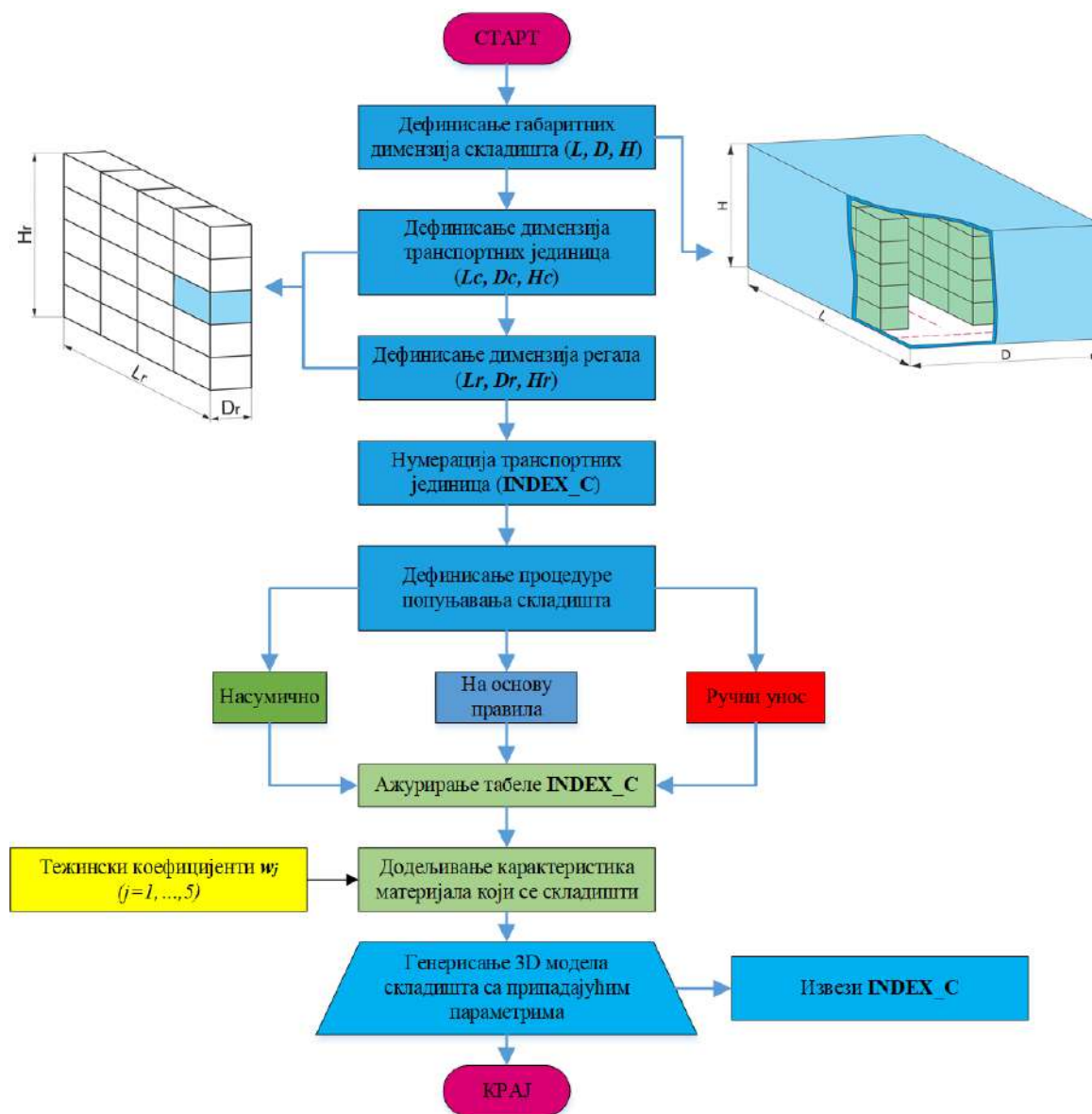
Претпоставимо да се корисна запремина једног типичног високорегалног складишта може представити уз помоћ габаритних димензија (дужина, ширина, висина), као што је представљено у оквиру фазе 1 (видети Сliku 3.2). Ради поједностављења приказа и

дефинисања параметара који зависе од распореда садржаја унутар истог, у даљем тексту биће коришћен дводимензионални приказ складишта из птичије перспективе, добијен на основу тродимензионалног модела који је приказан у оквиру фазе 2. Елементи високорегалног складишта приказаног на Слици 3.2 су: коридори за пролаз транспортних средстава, регали и простор за смештај складишних јединица. Сами регали означени су у распону $i=1, \dots, n \in \mathbb{N}$. Попуњавање регала у складишту (фаза 3) се врши попуњавањем складишних јединица које су представљене са три димензије L_p , D_p и H_p (дужином, ширином и висином, респективно). На основу математичког модела коришћеног у овој методи, као крајњи резултат у фази 4 на једноставан начин се могу добити параметри везани за регале и складишне јединице који се у циљу даљег прорачуна пожарних зона опасности могу представити у виду табеле (Слика 3.2) која представља све релевантне параметре груписане у оквиру индекса ћелија. У поменутој табели су садржани параметри везани за локацију свих складишних јединица, припадност складишних јединица регалима, бинарни статус простора за смештај складишних јединица тј. пун/празан, карактеристика материјала који је садржан у складишној јединици, као и за појединачну нумерацију складишних јединица.

На овај начин извршена је демонстрација предности употребе алтернативних решења за олакшано конфигурисање дизајна складишта и складишног простора као и могућности формирања различитих конфигурација layout-а. Тиме је омогућено брже генерисање и аквизиција параметара везаних за садржај у складишту који су неопходни код прорачуна везаних за одређивање зона опасности од пожара. Још једна од предности поменутог приступа лежи у чињеници да не постоји ограничење у смислу димензија складишта и броја складишних јединица, и исти се може применити и на високорегална складишта висина и неколико десетина метара. Важно је истаћи да се стратегија попуњавања складишта код овог поступка може реализовати на два начина: аутоматски и ручно. Аутоматско попуњавање складишта може бити по неком задатом правилу или насумично. Ручно попуњавање складишта подразумева ручну измену индекса ћелија којим се добија већа контрола над распоредом складишних јединица, али одузима много времена и повећана је могућност грешака.

Листа складишних јединица (INDEX_C) представља јединствену листу којом се дефинише стање у посматраном високорегалног складишту. Она садржи све потребне информације које описују тренутна стања, а све измене које се јављају у току симулације одражавају се променом параметара у овој листи. Свака складишна јединица садржи јединствен број, координате положаја тежишта складишних јединица у самом складишту, припадност складишних јединица одређеном регалу за смештај и стање попуњености складишних јединица. Ако је складишна јединица попуњена, материјал којим је складишна јединица

попуњена дефинисан је преко одговарајућег тежинског коефицијента w_i добијеног раније описаним поступком. Поступак дефинисања, тј. добијања листе складишних јединица представљен је алгоритмом приказаним на Слици 3.3.

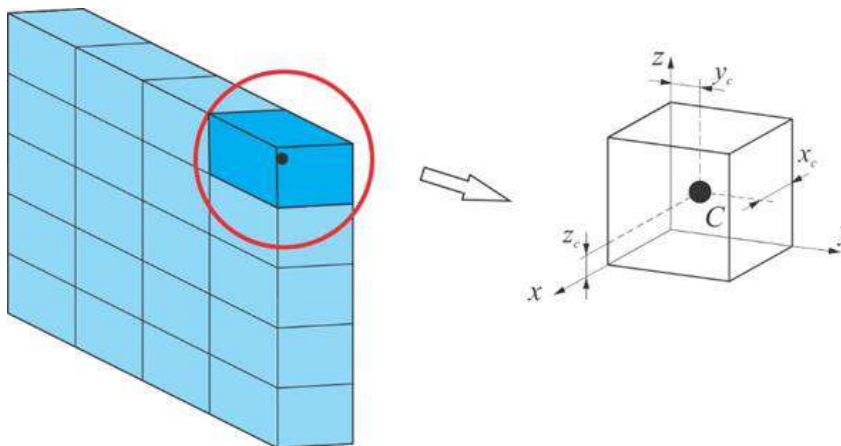


Слика 3.3 Алгоритам за формирање листе складишних јединица (INDEX_C)

На основу параметара из ове листе у сваком тренутку може се одредити број попуњених ћелија, тј. испуњеност складишта, као и испуњеност сваког појединачног регала. Ова листа дефинише се у облику табеле која се по потреби може извести у одговарајући формат читљив за људе, на пример *.xls. Тако извезена табела се може прегледати и може се вршити визуелна контрола података који су у њој приказани. Осим самог прегледа података, они се могу по потреби и ручно изменити, што овој методи даје одређени ниво флексибилности и повећане контроле над самим системом од стране корисника.

3.3 Поступак одређивања координата потенцијалних зона опасности од пожара

У циљу поједностављеног приказа и прорачуна, складишне јединице као тела одговарајућих габарита и карактеристика које у складишту заузимају само стационарни положај представиће се материјалном тачком. На овај начин се димензије складишних јединица могу сматрати бесконачно малим и под претпоставком да свака тачка запремине има иста својства тј. да је садржај складишне јединице хомоген, целокупна запремина може се представити тачком која означава тежиште тела и која је дефинисана својим координатама у тродимензионалном простору, као и тежинским коефицијентом одговарајућег материјала који у даљем прорачуну замењује масу.



Слика 3.4 Представљање складишне јединице у виду материјалне тачке [19]

Поступак процене тежишта складишних јединица представљених у облику материјалне тачке (Сл. 3.4) и одређивања тежинских коефицијената за материјале који се смештају у складиште главни су предуслови за одређивање потенцијалне зоне опасности од пожара. Класични приступ у методи центра гравитације (COG метода) који се користи у логистици [57–59], омогућава одређивање оптималних локација у дводимензионалном координатном систему XoY . За потребе процене потенцијалних зона опасности од појаве пожара и координата истих, користиће се унапређена варијанта метода центра гравитације за одређивање тежишта у тродимензионалном координатном систему која је примену нашла у областима медицине, електротехнике, механике итд. [60–62]. У оквиру Табеле 3.1 приказан је алгоритам за добијање координата у виду псеудокода у циљу лакшег разумевања самог поступка. Улазни параметри приликом одређивања потенцијалних зона опасности од пожара јесу координате тежишта складишних јединица (X_{ci} , Y_{ci} и Z_{ci}), као и тежински коефицијенти w_i , у којима су садржане вредности свих релевантних параметара везаних за пожар.

Табела 3.1 Псеудокод за одређивање координата тежишта [19]

Алгоритам 1. Псеудо код алгоритма за проналажење координата потенцијалних зона опасности од пожара

```

1:  УЛАЗ: Параметри  $X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}, Q_i$ 
2:  ИЗЛАЗ:  $COG\_X, COG\_Y, COG\_Z$ 
3:  Бројилац=0
4:  Именилац=0
5:  for  $i=1:n$ 
6:    Бројилацx= Бројилац+ $X_{ci} * Q_i$ 
7:    Бројилацy= Бројилац+ $Y_{ci} * Q_i$ 
8:    Бројилацz= Бројилац+ $Z_{ci} * Q_i$ 
9:    Именилац=  $\Sigma Q_i$ 
10: end
11:  $COG\_X = \text{Бројилац}_X / \text{Именилац}$ 
12:  $COG\_Y = \text{Бројилац}_Y / \text{Именилац}$ 
13:  $COG\_Z = \text{Бројилац}_Z / \text{Именилац}$ 
14: Постпроцесирање резултата

```

На основу претходно приказане процедуре за одређивање потенцијалних зона опасности од пожара, одређују се следећи параметри:

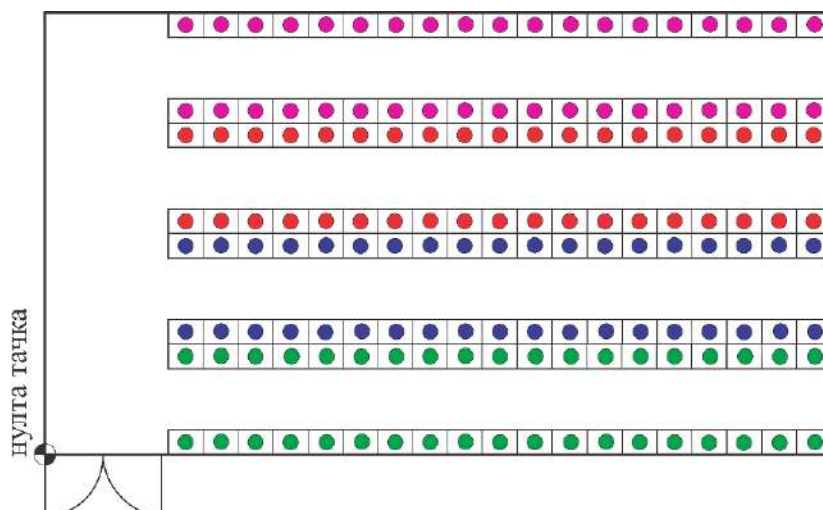
- параметри локације потенцијалне зоне опасности од појаве пожара у високорегалном складишту у виду координата X, Y и Z ,
- растојање зоне опасности од нулте тачке тј. улаза/излаза R ,
- радијус зоне опасности r које је дефинисан као растојање центра зоне опасности до најближе складишне јединице. Овај параметар представља полупречник сфере која обухвата складишне јединице на које је најнеповољније, са становишта безбедности и заштите на раду, да иницијална варница падне и изазове пожар.

3.4 Нумерички примери

3.4.1 Одређивање симулационих параметара за случај са четири врсте материјала

У овом одељку се разматра проблем прорачуна симулационих параметара у виду тежинских коефицијената, неопходних за одређивање потенцијалних зона опасности од пожара. За одређивање поменутих параметара користе се параметри високорегалног

складишта, са припадајућим распоредом, приказаним на Слици 3.5 и који су дати у раду [63].



Слика 3.5. Layout високорегалног складишта са припадајућим распоредом и материјалима (• дрво, • картон, • иверица и • PVC пластика)

На основу разматрања датих у одељку 3.1, у циљу добијања што релевантнијих података потребних за даљу симулацију одлучено је да се за алтернативе у процесу вишекритеријумског одлучивања одаберу 4 врсте чврстих материјала (дрво, картон, иверица и PVC пластика) које ће бити предмет даљег прорачуна. Листа материјала и нумеричке вредности параметара, за 7 унапред задатих карактеристика у вези са процесом сагоревања материјала, дати су у Табели 3.2. Карактеристике материјала које се односе на сагоревање, приказане у поменутој табели, представљају критеријуме у процесу вишекритеријумског одлучивања и исти су узети из литературе [64–71].

Табела 3.2 Улазни параметри у поступку одређивања тежинских коефицијената потребних за симулацију (4 материјала) [64–71]

Материјал	CO [mg/g]	CO ₂ [mg/g]	Густина дима [kg/m ³]	Температура паљења [°C]	Термичка проводљивост [W/mK]	Специфични топлотни капацитет [J/(kg K)]	Калоријска вредност [MJ/kg]
Дрво	6	1696	100	350	0,15	1360	14,4
Картон	0,1	1450	39,8	427	0,061	1400	13,5
Иверица	6	1774	400	150	0,13	2500	17
PVC пластика	71	657	55,03	391	0,185	900	41

Табела 3.2 садржи критеријуме (атрибуте) према редоследу представљеним у одељку 3.1. Свих седам наведених критеријума који су наведени у табели, подељени су у две групе. Критеријуми C1, C2 и C3 сматрају се значајним због негативног утицаја на здравље људи, а остали критеријуми C4, C5, C6 и C7 који су у директној вези са процесом сагоревања у

овом случају сматрају мање значајним. Алтернативе у вези са материјалима су означене са A_j ($j=1, \dots, 4$). Након претварања квалитативних атрибута у квантитативне, матрица одлучивања са додељеним тежинским коефицијентима и формирана на основу Једначине 3.1 приказана је у Табели 3.3.

Табела 3.3 Иницијална матрица одлучивања (w_{ei}) - Корак 1

Критеријуми	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Јединица мере	[mg/g]	[mg/g]	[kg/m ³]	[°C]	[W/mK]	[J/(kg K)]	[MJ/kg]
Циљ	max	max	max	min	min	min	min
	Значајни			Мање значајни			
Тежина	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
A1	6	1696	100	350	14,4	1360	0,15
A2	0,1	1450	3,8	427	13,5	1400	0,061
A3	6	1774	400	150	17	2500	0,13
A4	71	657	55,03	391	41	900	0,185

На основу једначине (3.2) извршена је нормализација вредности елемената матрице одлучивања тј. добија се нормализована матрица одлучивања (видети Табелу 3.4).

Табела 3.4 Нормализована матрица одлучивања (w_{ei}) - Корак 2

Критеријуми	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A1	0,30411	0,0722	0,17895	0,26555	0,21008	0,22078	0,16764
A2	0,26	0,0012	0,0068	0,32398	0,12815	0,22727	0,15716
A3	0,31809	0,0722	0,71578	0,11381	0,27311	0,40584	0,1979
A4	0,11781	0,85439	0,09847	0,29666	0,38866	0,1461	0,4773

Коришћењем Једначина (3.3 и 3.4) добијена је тежинска нормализована матрица одлучивања која је приказана у виду Табеле 3.5. Основни циљ нормализација је добијање бездимензионалних вредности различитих критеријуми за избор алтернатива тако да се ови критеријуми могу поредити.

Табела 3.5 Тежинска нормализована матрица одлучивања (w_{ei}) - Корак 3

Критеријуми	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A1	0,06082	0,01444	0,03579	0,02656	0,02852	0,02208	0,01676
A2	0,05211	0,00024	0,00136	0,0324	0,0116	0,02273	0,01572
A3	0,06362	0,01444	0,14316	0,01138	0,02471	0,04058	0,01979
A4	0,02356	0,17088	0,01969	0,02967	0,03517	0,01461	0,04773

Збир тежински нормализованих вредности је израчунат за све критеријуме коришћењем Једначина (3.5 и 3.6) где се врши максимизација значајних и минимизација мање значајних

критеријума. Релативни значај (тежина) за сваку од алтернатива је израчунат на основу Једначине (3.7), док је рангирање алтернатива извршено на основу Једначине (3.8). Сви резултати добијени прорачуном на основу корака (4-6), тј. коришћењем Једначина (3.5-3.8), представљени су у виду јединствене Табеле 3.6.

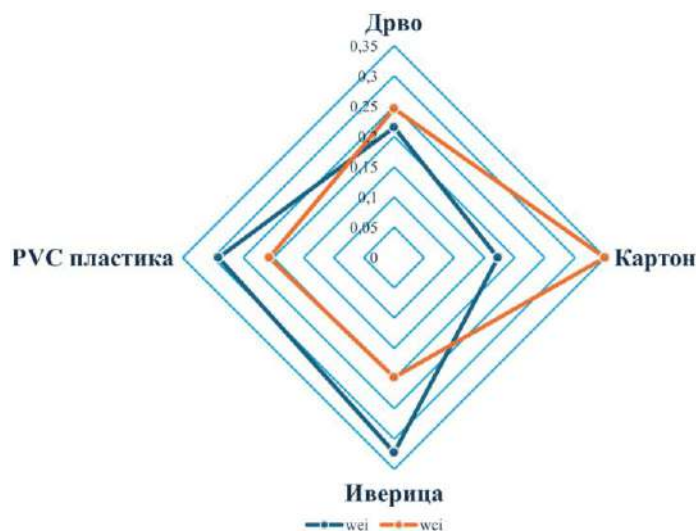
Табела 3.6 Резултати добијени спровођењем процедуре за одређивање тежине алтернатива у случају емисије штетних гасова (w_{ei}) - Кораца (4-6)

КОРАК 4				КОРАК 5	КОРАК 6	
S_{+i}	S_{-i}	S_{-min}/S_{-i}		w_{ei}	U_i	Ранг
0,11105	0,8778	0,8778		0,214916	21,49155	3
0,0536	1	1		0,171924	17,1924	4
0,22122	0,854538	0,85454		0,322327	32,23275	1
0,21413	0,64821	0,64821		0,290833	29,0833	2

На идентичан начин се могу одредити тежински коефицијенти у вези са сагоревањем w_{ci} када се у матрици одлучивања изврши замена тако да се параметри С4, С5, С6 и С7 сматрају значајним, а остали критеријуми С1, С2 и С3 сматрају мање значајним. Део поступка за одређивање поменутих тежинских коефицијената приказан је у Табели 3.7.

Табела 3.7 Резултати добијени спровођењем процедуре за одређивање тежине алтернатива у случају сагоревања (w_{ci}) - Кораца (4-6)

КОРАК 4				КОРАК 5	КОРАК 6	
S_{+i}	S_{-i}	S_{-min}/S_{-i}		w_{ci}	U_i	Ранг
0,05985	0,13761	0,62495		0,246211	70,45514	2
0,05126	0,086	1		0,349458	100	1
0,08769	0,2326	0,36973		0,197939	56,64168	4
0,10121	0,2438	0,35274		0,206392	59,06061	3



Слика 3.6 Поређење добијених тежинских коефицијената w_{ei} и w_{ci} за четири врсте материјала

На основу тежинских коефицијената w_{ei} и w_{ci} представљених у оквиру Табела 3.6 и 3.7, као и дијаграма приказаног на Слици 3.6 закључује се да је у случају емисије доминантни тежински коефицијент w_{e4} који се односи на PVC пластику, док је у случају сагоревања доминантни тежински коефицијент који се односи на картон.

Спирманов коефицијент корелације ранга (Spearman test ρ) представља бездимензиону мерну корелацију која се користи за одређивање постојећих веза између два скупа података [72,73]. Користи се за одређивање постојеће везе између два скупа података где су резултати добијени коришћењем ове процедуре увек на скали између 1 и (-1).

Табела 3.8 Подаци за прорачун Спирмановог коефицијента корелације ρ

	w_{ei}	w_{ci}	Ранг (w_{ei})	Ранг (w_{ci})	d	d^2
1	0,214916	0,246211	3	2	1	1
2	0,171924	0,349458	4	1	3	9
3	0,322327	0,197939	1	4	3	9
4	0,290833	0,206392	2	3	1	1
					Σ	20

Добијени резултати у виду тежинских коефицијената (Табела 3.8) упоређени су коришћењем корелационе анализе засноване на Спирмановим коефицијентима корелације рангова коришћењем једначине (3.9).

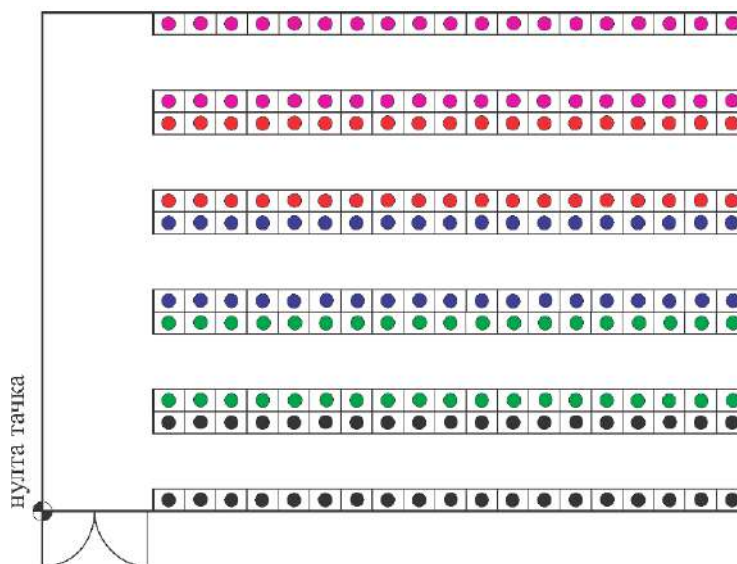
$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3.9)$$

где је d^2 - квадрат разлике између рангова, а n - број рангова (укупно 4).

На основу спроведеног прорачуна Спирманов коефицијент корелације ранга $|\rho| = 1$, што представља веома јаку корелацију.

3.4.2 Одређивање симулационих параметара за случај са пет врста материјала

Као и у претходном нумеричком примеру, разматра се проблем прорачуна симулационих параметара у виду тежинских коефицијената, који су неопходни за одређивање потенцијалних зона опасности од појаве пожара. За одређивање поменутих параметара користе се параметри високорегалног складишта, са припадајућим распоредом, приказаним на Слици 3.7. На основу разматрања датих у одељку 3.4.1, у циљу доказивања ефикасности методе и праћења промене тежинских коефицијената, одлучено је да се алтернативама у процесу вишекритеријумског одлучивања дода још једна врста чврстог материјала (гума). Листа материјала и нумеричке вредности свих алтернатива, за свих 7 параметара везаних за процес сагоревања материјала у виду складишних јединица, дата је у Табели 3.9.



Слика 3.7 Layout високорегалног складишта са припадајућим распоредом и материјалима
(• дрво, • картон, • иверица, • PVC и • гума)

Карактеристике свих материјала у поменутој табели које се односе на процес горења и који представљају критеријуме у процесу вишекритеријумског одлучивања узети су из наведене литературе. Параметри материјала приказаних у Табели 3.9 усвојени су за случај најгорег сценарија везаног за сагоревање материјала тј. усвојене су максималне вредности које су добијене експерименталним путем. Развијена метода представљена у оквиру поглавља 3.1 није у функцији времена, па се и параметри који се тичу одређивања тежинских коефицијената нпр. CO и CO₂, усвајају из доступне литературе као константне вредности.

Табела 3.9 Улазни параметри у поступку одређивања тежинских коефицијената потребних за симулацију (5 материјала) [64-71]

Материјал	CO [mg/g]	CO ₂ [mg/g]	Густина дима [kg/m ³]	Температура паљења [°C]	Термичка проводљивост [W/mK]	Специфични топлотни капацитет [J/(kg K)]	Калоријска вредност [MJ/kg]
Дрво	6	1696	100	350	0,15	1360	14,4
Картон	0,1	1450	39,8	427	0,061	1400	13,5
Иверица	6	1774	400	150	0,13	2500	17
PVC пластика	71	657	55,03	391	0,185	900	41
Гума	600	1911	8000	315	1,85	1880	35

Табела 3.10 садржи критеријуме (атрибуте) према редоследу представљеним у одељку 3.1. Свих седам наведених критеријума који су наведени у табели, подељени су у две групе. Критеријуми C1, C2 и C3 сматрају се значајним због штетног утицаја на здравље људи, а остали критеријуми C4, C5, C6 и C7 који су у директној вези са процесом сагоревања у

овом случају сматрају мање значајним. Свих пет материјала који у процесу вишекритеријумског одлучивања представљају алтернативе, означени су са A_j ($j=1, \dots, 5$). Матрица одлучивања која је формирана на основу једначине (3.1), након процеса претварања квалитативних атрибута у квантитативне, са припадајућим тежинским коефицијентима, представљена је у оквиру Табеле 3.10.

Табела 3.10 Иницијална матрица одлучивања (w_{ei}) - Корак 1

Критеријуми	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Јединица мере	[mg/g]	[mg/g]	[kg/m ³]	[°C]	[W/mK]	[J/(kg K)]	[MJ/kg]
Циљ	min	min	min	max	min	max	Min
	Корисни			Некорисни			
Тежина	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
A1	6	1696	100	350	14,4	1360	0,15
A2	0,1	1450	3,8	427	13,5	1400	0,061
A3	6	1774	400	150	17	2500	0,13
A4	71	657	55,03	391	41	900	0,185
A5	600	1911	8000	315	35	1880	1,85

На основу описане процедуре у оквиру COPRAS методе која је детаљно описана у претходном одељку, на основу Једначина (3.2-3.4), добијају се нормализована матрица одлучивања и тежинска нормализована матрица одлучивања (w_{ei}), које су представљене у виду Табеле 3.11.

Табела 3.11 Нормализована и тежинска нормализована матрица одлучивања (w_{ei}) - Кораци 2 и 3

КОРАК 2							
A1	0,00878	0,22650	0,01168	0,21433	0,06313	0,16915	0,11911
A2	0,00015	0,19364	0,00044	0,26148	0,02567	0,17413	0,11166
A3	0,00878	0,23691	0,04674	0,09186	0,05471	0,31095	0,14061
A4	0,10394	0,08774	0,00643	0,23944	0,07786	0,11194	0,33912
A5	0,87835	0,25521	0,93471	0,19290	0,77862	0,23383	0,28950
КОРАК 3							
A1	0,00176	0,04530	0,00234	0,02143	0,00631	0,01692	0,01191
A2	0,00003	0,03873	0,00009	0,02615	0,00257	0,01741	0,01117
A3	0,00176	0,04738	0,00935	0,00919	0,00547	0,03109	0,01406
A4	0,02079	0,01755	0,00129	0,02394	0,00779	0,01119	0,03391
A5	0,17567	0,05104	0,18694	0,01929	0,07786	0,02338	0,02895

Спровођењем даљих корака везаних за COPRAS методу, Збир тежински нормализованих вредности је израчунат за све критеријуме коришћењем Једначина (3.5 и 3.6) где се врши максимизација значајних и минимизација мање значајних критеријума. Релативни значај (тежина) за сваку од алтернатива је израчунат на основу Једначине (3.7), док је рангирање алтернатива извршено на основу Једначине (3.8). Сви резултати добијени прорачуном на основу корака (4-6), тј. коришћењем Једначина (3.5-3.8), приказани су у Табели 3.12.

Табела 3.12 Резултати добијени спровођењем процедуре за одређивање тежине алтернатива у случају емисије штетних гасова (w_{ei}) - Кораци (4-6)

КОРАК 4			КОРАК 5	КОРАК 6	
S_{+i}	S_{-i}	S_{-min}/S_{-i}	w_{ei}	U_i	Ранг
0,04939	0,0566	1	0,14821	32,8586	3
0,03885	0,0573	0,98738885	0,13642	30,2442	4
0,05849	0,0598	0,94582261	0,15195	33,6878	2
0,03962	0,0768	0,73626964	0,11238	24,9145	5
0,41365	0,1495	0,37844907	0,45105	100	1

Тежински коефицијенти у вези са сагоревањем w_{ci} , добијају се када се у матрици одлучивања изврши ротација параметара у матрици одлучивања (видети Табелу 3.10) тако да се критеријуми С4, С5, С6 и С7 сматрају значајним, а остали критеријуми С1, С2 и С3 сматрају мање значајним. Кораци (4-6) у поступку одређивања тежинских коефицијената w_{ci} , представљен је у Табели 3.13.

Табела 3.13 Резултати добијени спровођењем процедуре за одређивање тежине алтернатива у случају сагоревања (w_{ci}) - Кораци (4-6)

КОРАК 4			КОРАК 5	КОРАК 6	
S_{+i}	S_{-i}	S_{-min}/S_{-i}	w_{ci}	U_i	Ранг
0,03364	0,07181	0,890464834	0,19179	82,62265	4
0,03168	0,06584	0,971262209	0,20418	87,96209	3
0,05135	0,06871	0,930749428	0,21666	93,33521	2
0,05452	0,06395	1	0,23213	100	1
0,12880	0,42969	0,148824442	0,15523	66,87452	5



Слика 3.8 Поређење добијених тежинских коефицијената w_{ei} и w_{ci} за пет врста материјала

За разлику од претходног примера, када се листа од четири материјала допуни са још једним материјалом, у овом случају гумом, вредности тежинских коефицијената се драстично мењају, што је и приказано у Табелама 3.9 и 3.10 и дијаграмом на Слици 3.8. У случају емисије као најутицајнији тежински коефицијент издваја се w_{e5} који се односи на гуму, док је у случају сагоревања доминантни тежински коефицијент w_{c4} који се односи на PVC пластику.

Спровођењем процедуре приказане у претходном примеру, а која се односи на одређивање Спирмановог коефицијента корелације ранга, добија се вредност коефицијента корелације ранга $|\rho| = 0,73$, што се у овом случају може сматрати за јаку корелацију.

4. ПРИМЕНА РАЗВИЈЕНЕ МЕТОДЕ НА НАЈЧЕШЋЕ СЛУЧАЈЕВЕ КОНФИГУРАЦИЈЕ СКЛАДИШТА

Смањење трошкова складиштења и оптимално коришћење простора од примарног су значаја приликом планирања складишта. Код активности које су везане за пројектовање складишта фокус је на позиционирању коридора, димензијама и локацији регала, улаза/излаза, висини складиштења, укупном капацитету, опреми за складиштење, решењима за аутоматизацију и информационим системима. Физички распоред може се описати као конфигурација пролаза и трака за транспортна средства, висине слагања, опреме за складиштење и опслуживање складишта, укључујући у том случају регале, виљушкаре и регалне дизалице [74].

Циљ овог поглавља је демонстрација примене развијене методе за одређивање потенцијалних зона опасности од пожара на неколико карактеристичних примера конфигурације распореда у складишту. Симулација је урађена за 4 различита распореда регала (layout-a) у складишту и складишних јединица у регалима и то на следећи начин:

- Варијанта 1 - Случај када је испуњеност целокупног простора у складишту 100% са два карактеристична распореда регала,
- Варијанта 2 - Случај када је укупна испуњеност складишта 70% са четири карактеристична распореда регала и 7 начина испуне складишних јединица у регалима,
- Варијанта 3 - Случај када је испуњеност складишта 70% са четири карактеристична распореда регала и 20 начина испуне складишних јединица у регалима.
- Варијанта 4 - Случај када је испуњеност складишта 50% са са четири карактеристична распореда регала и 20 начина испуне складишних јединица у регалима.

Поступак за одређивање потенцијалних зона опасности од појаве пожара приказан је псеудокодом у оквиру Табеле 4.1

Табела 4.1 Псеудокод за одређивање зона опасности од појаве пожара

Алгоритам 2. Псеудо код алгоритма за одређивање зона опасности од пожара

```
1:  Учитавање INDEX фајлова (INDEX_C и INDEX_R)
2:  Додељивање карактеристика материјала ( $w_{ei}$  и  $w_{ci}$ )
3:  for  $i=1:size(INDEX\_C, 1)$ 
4:       $prekidac=INDEX\_C(i,12)$ 
5:      switch prekidac
6:      case 1
7:           $INDEX\_C(i,12)=materijal1$ 
8:      case 2
9:           $INDEX\_C(i,12)=materijal2$ 
10:     case 3
11:         $INDEX\_C(i,12)=materijal3$ 
12:     case 4
13:         $INDEX\_C(i,12)=materijal4$ 
14:     case 5
15:         $INDEX\_C(i,12)=materijal5$ 
16:     otherwise
17:         $INDEX\_C(i,12)=0$ 
18:     end for
19:  Додели свим складишним јединицама у складишту карактеристику (тежински
коэффициент)
20:  Формирање индекса палета
22:   $INDEX\_P=zeros(1, 6)$ 
23:   $j=0$ 
24:  for  $i=1:size(INDEX\_C, 12)$ 
25:   $j=j+1$ 
26:  Одреди координате почетног и крајњег темења коцке (складишне јединице)
27:   $X_{C1}=INDEX\_C(i,2)$ 
28:   $Y_{C1}=INDEX\_C(i,3)$ 
29:   $Z_{C1}=INDEX\_C(i,4)$ 
30:   $X_{C7}=INDEX\_C(i,5)$ 
31:   $Y_{C7}=INDEX\_C(i,6)$ 
32:   $Z_{C7}=INDEX\_C(i,7)$ 
```



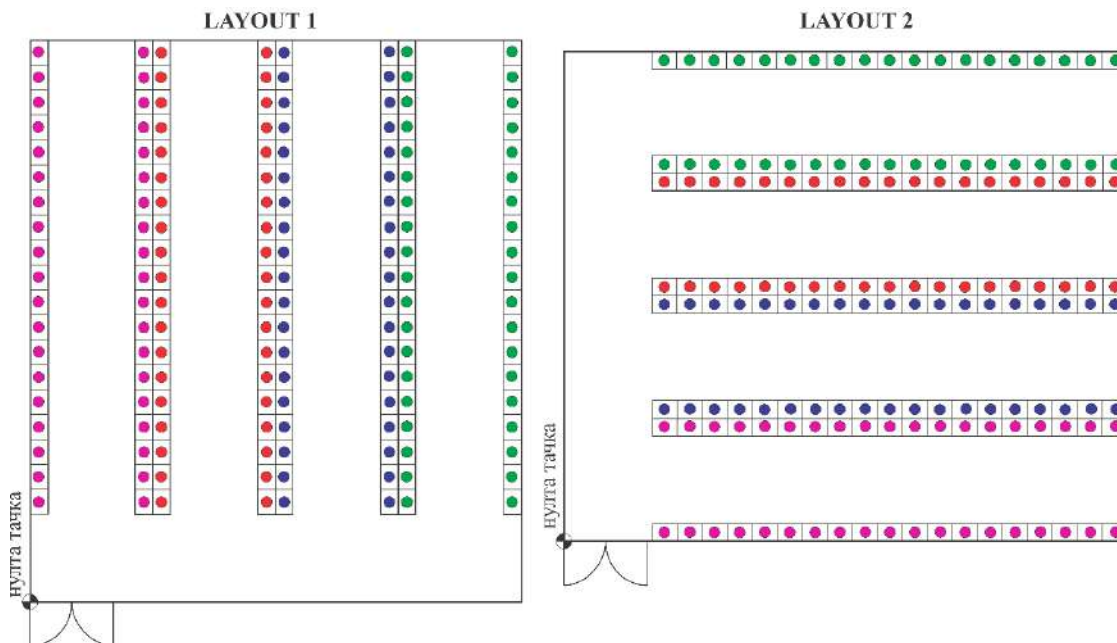
- 33: *Одреди тежишта свих складишних јединица у складушту*
- 34: $X_{CT} = XC1 + (XC7 - XC1) / 2$ - *X координата тежишта складишне јединице*
- 35: $Y_{CT} = YC1 + (YC7 - YC1) / 2$ - *Y координата тежишта складишне јединице*
- 36: $Z_{CT} = ZC1 + (ZC7 - ZC1) / 2$ - *Z координата тежишта складишне јединице*
- 37: **end for**
- 38: Почетни услови
- 39: $COGX = 0$
- 40: $COGY = 0$
- 41: $COGZ = 0$
- 42: $SumQX = 0$
- 43: $SumQY = 0$
- 44: $SumQZ = 0$
- 45: $SumQ = 0$
- 46: Унос параметара у табелу INDEX_P
- 47: **for** $i = 1 : size(INDEX_P, 1)$
- 48: $Qi = INDEX_P(i, 5)$ - *параметри материјала који се складиште*
- 49: $Xi = INDEX_P(i, 2)$ - *X координата*
- 50: $Yi = INDEX_P(i, 3)$ - *Y координата*
- 51: $Zi = INDEX_P(i, 4)$ - *Z координата*
- 52: $SumQX = sumQX + Qi * Xi$
- 53: $SumQY = sumQY + Qi * Yi$
- 54: $SumQZ = sumQZ + Qi * Zi$
- 55: **end for**
- 56: Одређивање просторних координата зоне опасности од појаве пожара
- 57: $COG_X = SumQX / SumQ$
- 58: $COG_Y = SumQY / SumQ$
- 59: $COG_Z = SumQZ / SumQ$
- 60: Одређивање рстојања зоне опасности од појаве пожара од нулте тачке (0, 0, 0)
- 61: $rastojanje = Sqrt(COG_X^2 + COG_Y^2 + COG_Z^2)$
- 62: *Постпроцесирање резултата*
- 63: *Генерисање дијаграма, табела и слика*
-

4.1 Варијанта 1 - испуњеност складишта 100%

4.1.1 Складиште испуњено са 4 врсте материјала

Сваки од четири материјала садржаних у Табели 3.2 у високорегалном складишту заузима по два регала са по 120 складишних јединица, тако да укупан број регала у складишту износи 8, односно у складишту може бити смештено максимално 960 складишних јединица. Реткост је да се у пракси срећу случајеви испуњености складишта од 100%, али у циљу доказивања ефикасности методе иста може бити примењена код ситуација када имамо потпуну испуњеност складишта са сва четири материјала подједнако. Овом варијантом су обухваћени распореди у складишту број 1 и број 2 (LAYOUT 1 и LAYOUT 2).

Шема распореда у складишту са четири врсте материјала приказана је на Слици 4.1.



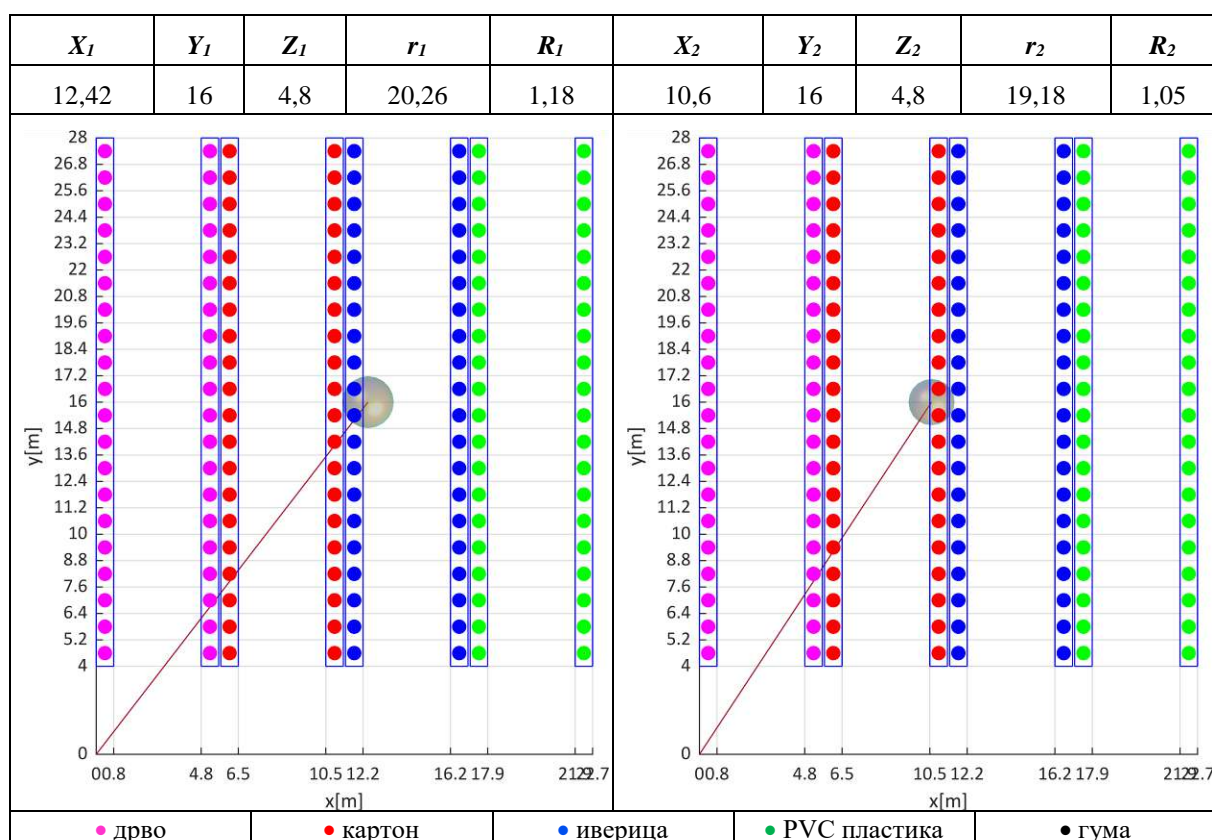
Слика 4.1 Распоред у складишту за четири врсте материјала - LAYOUT 1 и LAYOUT 2

(• дрво, • картон, • иверица и • PVC пластика)

• LAYOUT 1

Параметри код оваквог распореда у складишту су дужина $a=28\text{ m}$, ширина $b=22,7\text{ m}$ и висина $h=10\text{ m}$, са ширином коридора за пролаз између регала $c=4\text{ m}$. На основу Табеле 4.2, може се закључити следеће:

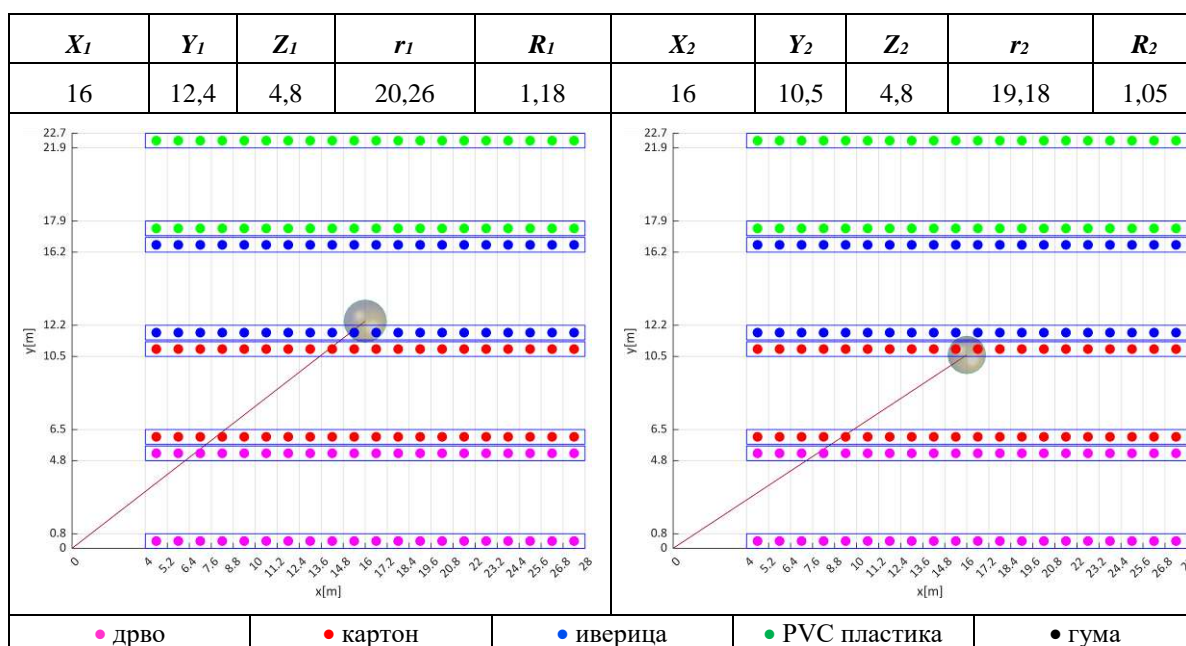
- Због симетричног распореда регала унутар складишта и потпуне испуњености складишним јединицама, није дошло до промене координата по Y и Z оси, тј. координате су у оба случаја једнаке,
- У случају тежинских коефицијената везаних за емисију, локација потенцијалне зоне опасности од пожара најближа је петом регалу који је испуњен складишним јединицама са иверицом због највеће вредности тежинског коефицијента за тај материјал $w_{e3}=0,322327$.
- Због доминантног тежинског коефицијента који се односи на картон $w_{c2}=0,349458$, у случају сагоревања локација потенцијалне зоне опасности од пожара по X оси је најближа четвртом регалу који је испуњен складишним јединицама са картоном.

Табела 4.2 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за Layout 1


• LAYOUT 2

Параметри код оваквог распореда у складишту су дужина $a=28$ m, ширина $b=27,1$ m и висина $h=10$ m, са ширином коридора за пролаз између регала $c=4$ m. На основу Табеле 4.3 и слика у саставу табеле, може се закључити следеће:

- Због симетричног распореда регала унутар складишта и потпуне испуњености складишним јединицама, нема промене координата по X и Z оси, тј. координате су у оба случаја једнаке,
- Као и у претходном случају, код тежинских коефицијената везаних за емисију, локација потенцијалне зоне опасности од пожара је најближа петом регалу који је испуњен складишним јединицама са иверицом што је у директној вези са највећом вредношћу тежинског коефицијента за тај материјал $w_{e3}=0,322327$.
- Због тежинског коефицијента који се односи на картон $w_{c2}=0,349458$ и који по рангу има највећу вредност у случају сагоревања, локација потенцијалне зоне опасности од пожара по Y оси најближа је четвртом регалу који је испуњен складишним јединицама са картоном.

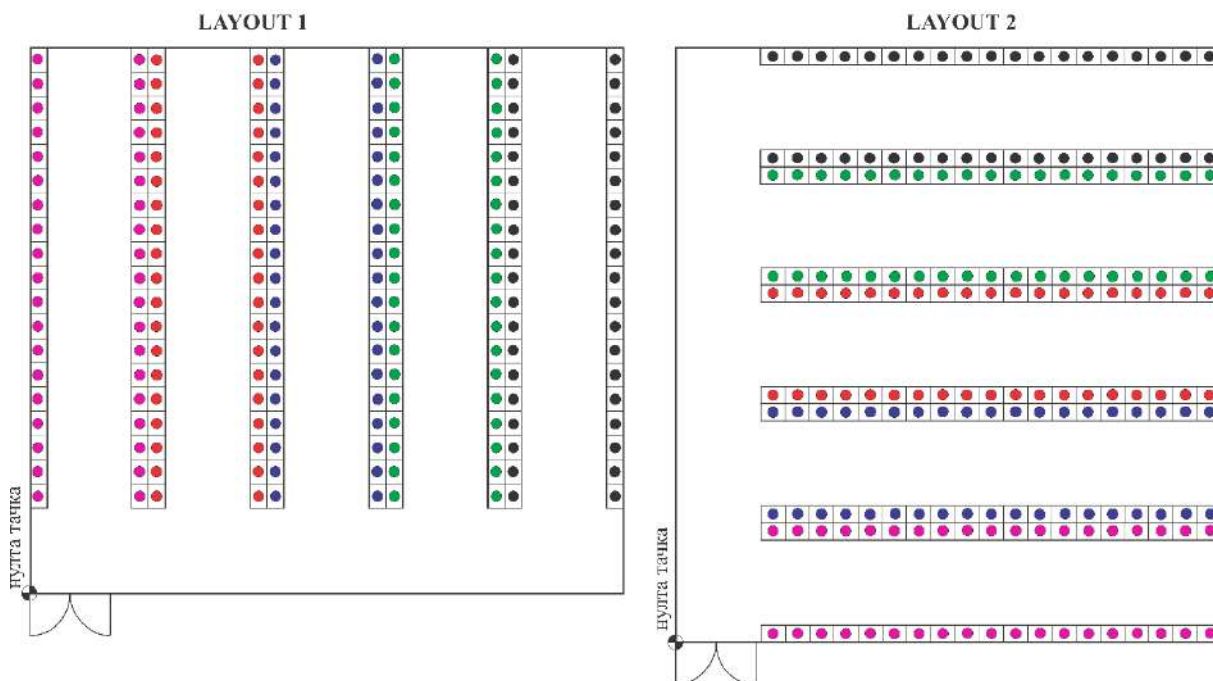
Табела 4.3 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за Layout 2


4.1.2 Складиште испуњено са 5 врста материјала

Сваки од пет материјала представљених у Табели 3.7 у високорегалном складишту заузима по два регала са по 120 складишних јединица, тако да укупан број регала у складишту износи 10, односно у складишту може бити смештено максимално 1200 складишних јединица. У пракси, потпуна испуњеност складишта (100 %) је веома ретка појава, али у циљу показивања ефикасности развијене методе иста ће бити примењена за случај потпуно испуњеног складишта. У циљу добијања што релевантнијих резултата симулације, извршена је корекција распореда у виду измене прва два и последња два регала који су

испуњени транспортним јединицама са дрветом и гумом. Овом варијантом обухваћени су распореди у складишту број 1 и број 2 (LAYOUT 1 и LAYOUT 2).

Шема распореда у складишту са пет врста материјала приказана је на Слици 4.2.



Слика 4.2 Распоред у складишту за пет врста материјала - LAYOUT 1 и LAYOUT 2

(• дрво, • картон, • иверица, • PVC пластика и • гума)

• LAYOUT 1

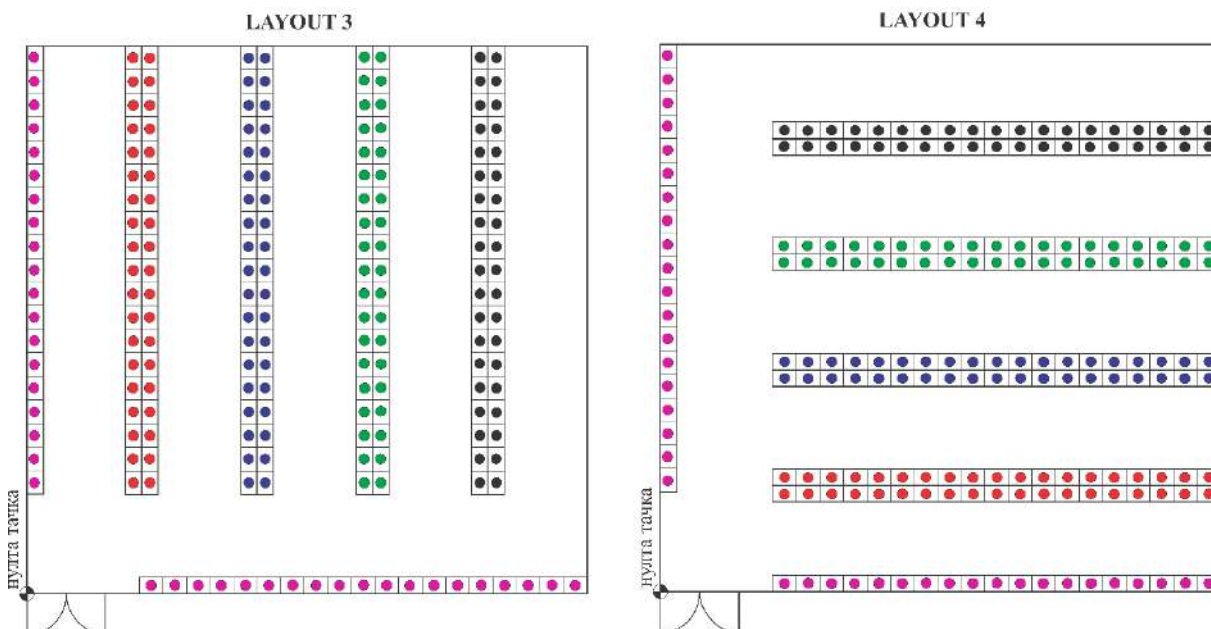
За разлику од распореда у складишту приказаног на Слици 4.1, у овом случају је укупан број регала у складишту је 10. Параметри који су везани за габарите складишта код оваквог распореда јесу дужина $a=28\text{ m}$, ширина $b=28,4\text{ m}$ и висина $h=10\text{ m}$, са ширином коридора за пролаз између регала $c=4\text{ m}$.

• LAYOUT 2

За разлику од претходног распореда у складишту (Layout 1), регали испуњени складишним јединицама имају хоризонталну оријентацију уместо вертикалне. Параметри који се односе на димензије складишта код оваквог типа распореда су: дужина складишта $a=28,4\text{ m}$, ширина складишта $b=28\text{ m}$ и висина $h=10\text{ m}$, са припадајућом ширином коридора за манипулацију и пролаз између регала $c=4\text{ m}$.

4.2 Варијанта 2 - укупна испуњеност складишта 70%

За разлику од Варијанте 1 која разматра потпуно испуњена складишта која су ретко заступљена у пракси, Варијантом 2 обухваћена су складишта чија је испуњеност 70% и која се срећу у реалним условима. Тестирање ефикасности развијене методе врши се комбиновањем распореда складишних јединица у регалима тако да укупни проценат испуњености складишта износи максимално 70% као у раду [63]. За разлику од претходног одељка, код ове варијанте биће примењен иницијални распоред где складишне јединице са дрветом заузимају прва два регала, док су складишне јединице са гумом заступљене код крајњих регала. Овом варијантом испуњености обухваћена су још два додатна распореда у складишту (Сл. 4.3) и укупно их има четири.

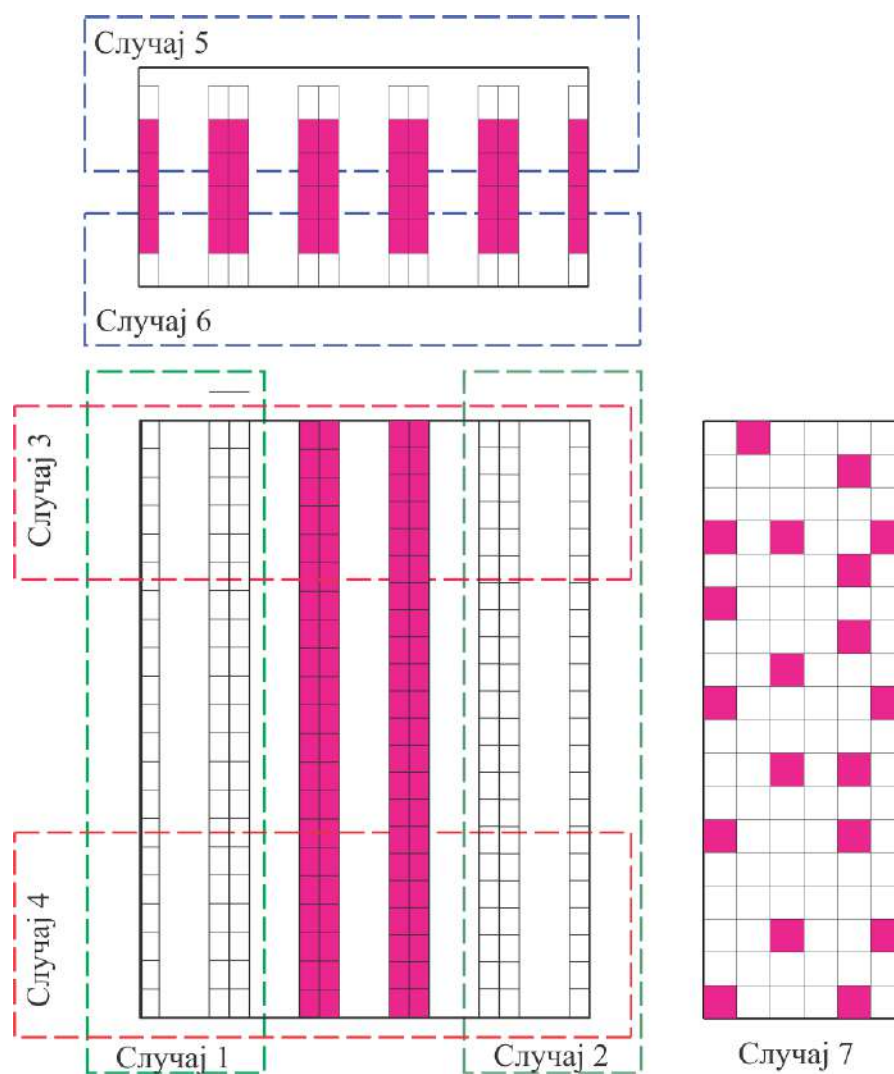


Слика 4.3 Додатни распореди у складишту (LAYOUT 3 и 4)

Приликом формирања новог распореда мора се руководити правилом да процентуални удео сваког од материјала у складишту буде једнак тј. да износи 20% од укупног броја складишних јединица. Умањењем броја складишних јединица на овај начин сваки од регала садржи по 168 транспортних јединица, респективно. У циљу потврђивања функционалности методе и упоредног приказа резултата извршен је прорачун координата X , Y , Z и вектора растојања r од нулте тачке складишта за следеће случајеве испуњености складишта (видети Сliku 4.4):

- Случај 1: Прва три регала на левој страни складишта су у потпуности испражњена и попуњавање складишта са преосталих 840 складишних јединица креће од регала број 4,

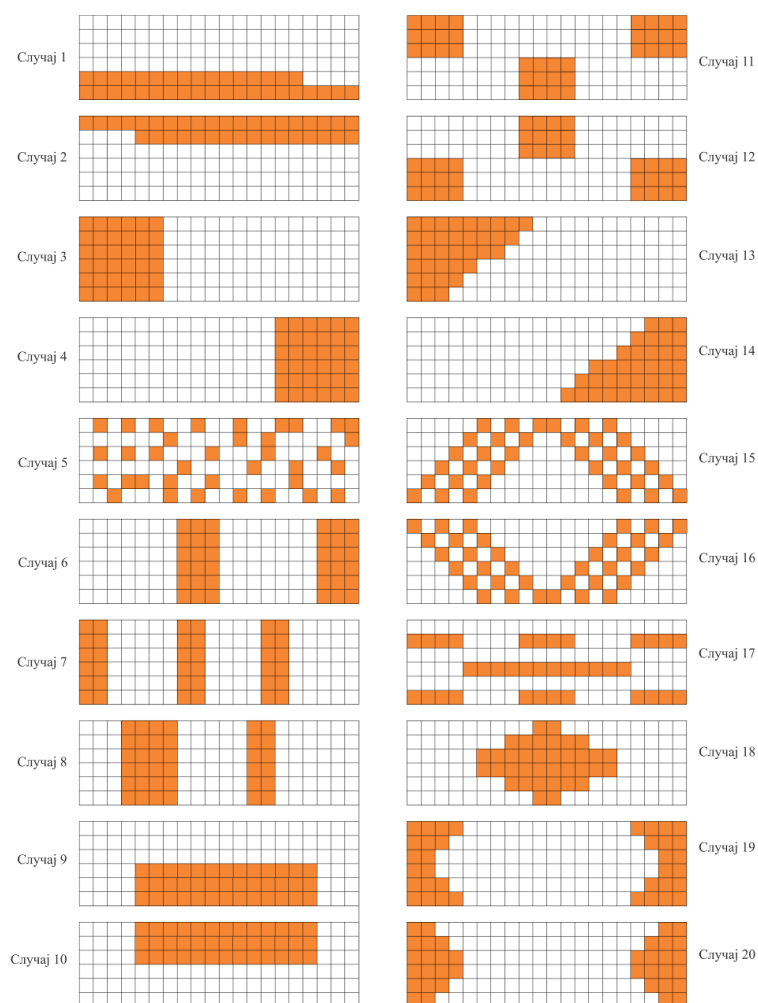
- Случај 2: Последња три регала на десној страни складишта су у потпуности испразњена и попуњавање складишта са преосталих 840 складишних јединица креће од регала број 1,
- Случај 3: Садржај сваког од регала на горњој чеonoј страни се умањује за 30%,
- Случај 4: Садржај сваког од регала на доњој чеonoј страни се умањује за 30%,
- Случај 5: Садржај сваког од регала се у крајњим горњим редовима умањује за 30%,
- Случај 6: Садржај сваког од регала се у почетним доњим редовима умањује за 30%,
- Случај 7: Садржај сваког од регала се умањује за 30% и распоред складишних јединица унутар регала се врши насумично.



Слика 4.4 Случајеви испуњености складишта од 70%

4.3 Варијанта 3 - укупна испуњеност складишта 70% са четири карактеристична распореда регала и 20 начина испуне складишних јединица у регалима

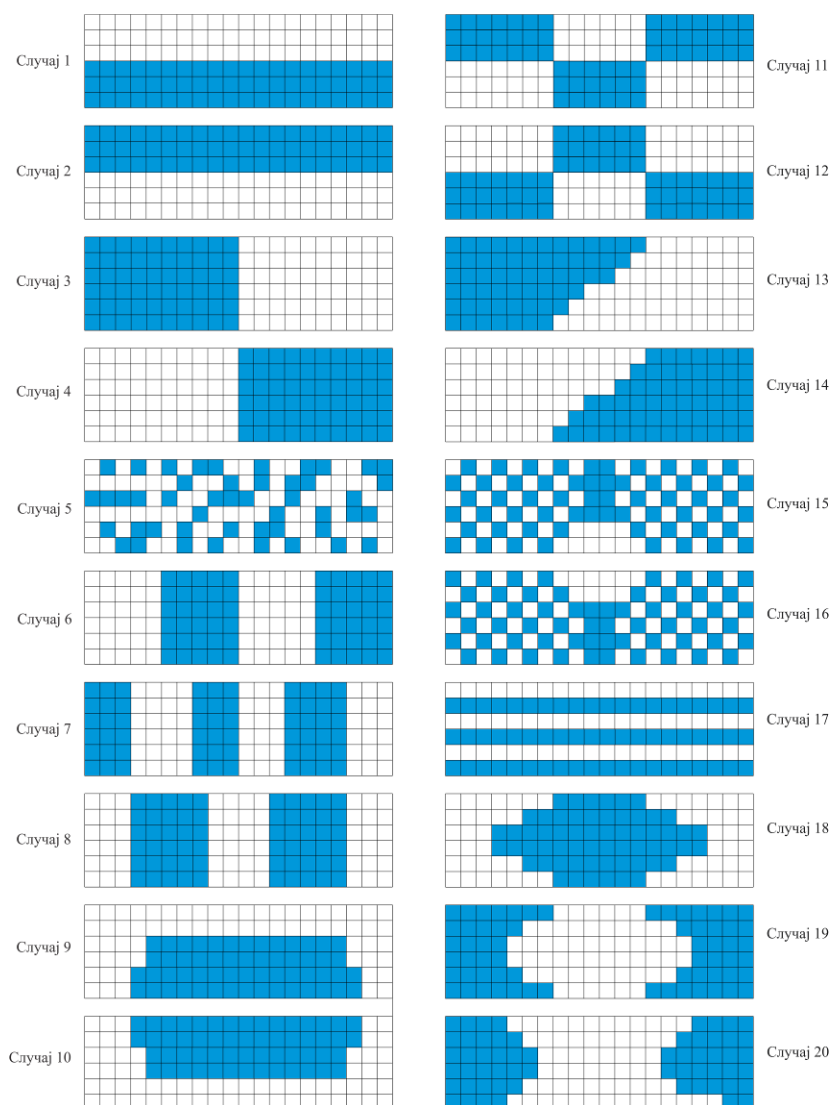
Слично као у претходном одељку, и код ове варијанте распореда регала и складишних јединица, поред укупног процентулног удела складишних јединица од 70% унутар сваког од регала, мора се водити рачуна о томе да сваки од материјала којим су испуњене складишне јединице заузима по два регала од укупно десет, колико их има у складишту. Провера ефикасности методе код ове варијанте распореда вршиће се на сваком од четири распореда регала. Од 20 (двадесет) предложених случајева испуњености регала складишним јединицама (видети слику 4.5) насумично је одабрана једна комбинација. Као и код претходне варијанте 4.2, примењен је иницијални распоред где складишне јединице са дрветом заузимају прва два регала, док су складишне јединице са гумом заступљене код крајњих регала и обратно.



Слика 4.5 Карактеристични случајеви попуњености регала складишним јединицама од 70% (20)

4.4 Варијанта 4 - укупна испуњеност складишта 50% са четири карактеристична распореда регала и 20 начина испуне складишних јединица у регалима

У циљу постизања што квалитетнијих резултата симулације и доказивања ефикасности развијене методе последњом варијантом обухваћени су сви карактеристични распореди регала у складишту и двадесет случајева испуњености регала складишним јединицама са уделом од 50%. За потребе симулације, као и код претходне варијанте, користиће се једна од насумично одабраних комбинација случајева испуњености регала за сва четири карактеристична распореда где ће се извршити замена прва два и последња два регала са дрветом и гумом. Карактеристични случајеви попуњености регала складишним јединицама са уделом од 50% којих има укупно двадесет, приказани су на Слици 4.6.



Слика 4.6 Карактеристични случајеви попуњености регала складишним јединицама од 50% (20)

5. ОПТИМИЗАЦИЈА СКЛАДИШТА ПРИМЕНОМ ОПТИМИЗАЦИОНИХ МЕТОДА И КОРИШЋЕЊЕМ РАЗВИЈЕНОГ НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА

5.1 Уводне напомене

Као што је у претходним поглављима објашњено, одређивање потенцијалних зона опасности од пожара врши се кроз неколико етапа. Прва етапа при одређивању зона опасности од пожара обухвата поступак одређивања симулационих параметара у виду тежинских коефицијената. Ови параметри се одређују за случај када су доминантни фактори који се тичу емисије штетних продуката сагоревања и за случај када су доминантни фактори који се тичу самог процеса сагоревања. Друга фаза подразумева генерисање одговарајућих табела индекса (INDEX_C и INDEX_R) за све конфигурације регала и распореда складишних јединица у високорегалном складишту. У трећој фази се врши симулација тј. одређивање потенцијалних зона опасности у складишту коришћењем процедуре описане псеудокодом у Табели 4.1.

С обзиром да пожари у складиштима представљају значајну претњу, просторна дистрибуција појаве пожара у високорегалном складишту од великог је значаја за превенцију и контролу пожара, као и за процес управљања и контроле истог. Предвиђање потенцијалних зона опасности и вероватноће појаве од великог су значаја приликом дефинисања стратегија заштите и мапирања опасности од појаве пожара. На овај начин развијена метода за одређивање зона опасности представља одговор на пожаре у складиштима у виду распореда опреме у складишту, као и потребних ресурса за гашење пожара и евакуацију запослених у складишту.

У циљу побољшања напред наведеног, неопходно је извршити одабир погодне конфигурације складишта са одговарајућим распоредом регала, процентуалном испуњеношћу регала складишним јединицама и распореда материјала по складишним јединицама, а све у циљу подизања нивоа противпожарне заштите везане за људство и сами објекат.

У поступку оптимизације користиће се исти случајеви конфигурације складишта као и у претходном поглављу - двадесет случајева испуњености регала складишним јединицама са одговарајућим процентуалним уделом и истим врстама материјала којима су испуњене складишне јединице.

5.2 Појам оптимизације

У многим научним областима, али и у свакодневном животу, неретко се поставља задатак проналажења оптималне вредности неке величине (најчешће минималне или максималне), за унапред познате услове тј. ограничења. У том смислу, потребно је извршити трансформацију предмета истраживања из реалног модела у адекватан математички модел. Другим речима, предмет оптимизације мора бити дефинисан на одређени начин уз помоћ одговарајућих математичких функција које могу бити линеарне и нелинеарне. Сам процес тражења оптимума представља поступак тражења минимума или максимума функције којом је дати проблем описан. Оптимум се може дефинисати као најбоље решење за унапред познате услове. Приликом одређивања оптималног решења, у циљу провере да ли је добијено решење оптимално, мора постојати одговарајућа смерница којом се одређује квалитет добијеног решења упоређивањем са другим решењима. Стога је потребно да у оквиру математичког модела постоји функција којој се при сваком новом прорачуну додељује добијена нумеричка вредност. Ова функција се назива функција циља [75].

Сама оптимизација представља сложен процес одређивања оптималног решења и реализује се кроз више фаза и нивоа одлучивања. Према релевантној литератури, процес оптимизације може се поделити у неколико корака, који се извршавају секвенцијално: дефиниција проблема, формулација проблема, решавање математичког модела проблема, имплементација решења и валидација добијених резултата оптимизације. Решавање конкретних проблема коришћењем неког од поступака оптимизације представља комплексну процедуру. Поред познавања суштине самог проблема, неопходно је познавање техника програмирања и оптимизационих алгоритама због потребе подешавања параметара самог оптимизационог алгорита.

5.3 Подела и развој оптимизационих алгоритама

Постоји неколико начина класификација оптимизационих метода, али се најчешће сврставају у три основне групе: градијентне оптимизационе методе, оптимизационе методе директне претраге и савремене методе оптимизације. Због недовољне ефикасности, прве две групе метода се могу применити код оптимизационих проблема мање сложености.

Осим тога, примена градијентне методе подразумева извесна ограничења. Прво ограничење ове методе је да функција циља мора бити бар два пута диференцијабилна и непрекидна. Друго ограничење градијентне методе у решавању сложених оптимизационих проблема јесте поседовање искуства у примени исте тј. почетне вредности променљивих које се задају морају бити приближне жељеним вредностима. Методе директног претраживања не захтевају да функција циља буде диференцијабилна и непрекидна, а ефикасност ових метода је изражена приликом претраге решења у пољу локалних минимума [76].

Последњих неколико деценија, а посебно, крајем XX и почетком XXI века, у употреби су алгоритми који омогућавају решавање сложених оптимизационих проблема на ефикасан начин. Ови алгоритми се називају метахеуристички алгоритми и често су инспирисани појавама и процесима у природи, тј. опонашају добре карактеристике и појаве из природе. Поделу метахеуристичких алгоритама је могуће извршити на више начина. У раду [77] је извршена подела метахеуристичких алгоритама на детерминистичке и стохастичке. Метахеуристику је могуће поделити и на оптимизационе алгоритме који су засновани на популацији решења (population-based) и алгоритме који се заснивају на једном потенцијалном решењу (single-solution based). Поред наведених подела, у литератури постоји и подела метахеуристичких оптимизационих алгоритама на алгоритме који користе меморију због памћења претходних решења (memory usage methods) и оне који немају могућности бележења претходних решења (memoryless methods). Метахеуристичке оптимизационе алгоритме је могуће још поделити на алгоритме који су биолошки инспирисани (bio-inspired) и оне који не припадају овој групи (non bio-inspired).

У овом поглављу акценат је на употреби метахеуристичких оптимизационих алгоритама који опонашају процесе и појаве који се дешавају у природи. Процес еволуције представљао је инспирацију за развој првог метахеуристичког алгоритма - генетског алгоритма (Genetic Algorithm - GA), који је настао педесетих година прошлог века [78] и који уз помоћ различитих математичких оператора симулира Дарвинову теорију еволуције [79]. Двадесетак година касније, Киркпатрик је инспирацију за развој новог алгоритма пронашао у процесу каљења у металургији и развио алгоритам заснован на трајекторији који је назвао симулирано каљење (Simulated Annealing – SA) [80]. Решавајући проблем трговачког путника у оквиру своје докторске дисертације која се бави оптимизацијом на бази природних алгоритама, Дориго је 1992. године развио алгоритам мрава (Ant Algorithm – AA) [81]. Алгоритам мрава је представљао базну верзију алгоритма чијом су адаптацијом 1999. године Дориго и Каро креирали алгоритам оптимизације колонијом мрава (Ant Colony Optimization – ACO) [82]. Инспирисани понашањем и интелигенцијом птица и њиховим прилагођавањем да дођу до склоништа, Кенеди и Еберхарт су 1995. године

представили алгоритам оптимизације ројем честица (Particle Swarm Optimization – PSO) [83]. Две године касније, Сторн и Прајс развили су нов еволуциони алгоритам под називом алгоритам диференцијалне еволуције (Differential Evolution - DE) који представља проширену верзију генетског алгоритма [84]. Након појаве DE алгоритма, као и алгоритама PSO и ACO, развијено је стотине нових метахеуристичких алгоритама заснованих на ројевима, као и побољшане и хибридне варијанте постојећи. Почетак XXI века представља значајан период развоја нових биолошки инспирисаних алгоритама као што су алгоритам свица (Firefly Algorithm – FA) инспирисан трепћућим понашањем свица [85], алгоритам кукавичје претраге (Cuckoo Search – CS) инспирисан понашањем кукавица код полагања јаја у гнезда других птица [86] и алгоритам слепог миша (Bat Algorithm – BA) који је инспирисан ехолокацијским понашањем слепих мишева [87]. Године 2020. први пут је примењен оптимизациони алгоритам за претрагу и спасавање (Search and rescue optimization algorithm - SARO) који је инспирисан истраживачким понашањем људи током операција потраге и спасавања [88].

Треба нагласити да се континуирано ради на развоју нових метахеуристичких алгоритама и да је њихов број у сталном порасту. Детаљан преглед досадашњих оптимизационих алгоритама је дат у раду [89], док је примена биолошки инспирисаних алгоритама у области заштите од пожара дата у оквиру референци [90–93]. Према истраживању у оквиру рада [94], постоји више од 500 метахеуристичких алгоритама који су развијени до данас, а преко 350 је представљено у последњих десет година. Наведени податак о броју развијених метахеуристичких оптимизационих алгоритама није коначан, већ се перманентно ради на унапређењу постојећих и стварању нових алгоритама где природа представља неисцрпни извор инспирације за истраживаче. У овом поглављу фокус је на примени два оптимизациона алгоритма у поступку одређивања потенцијалних зона опасности од пожара: алгоритам диференцијалне еволуције (DE) и алгоритам трагања и спасавања (SARO).

Прегледом релевантне литературе везане за оптимизацију, DE алгоритам се показао као прилично ефикасан у решавању различитих типова инжењерских проблема. DE алгоритам поседује велику ефикасност у претраживању простора током поступка оптимизације, али се може десити да овај алгоритам не достигне циљани глобални минимум већ да се заглави у локалном минимуму. У том случају не постоји гаранција да ће пронађено решење бити уједно и најбоље решење. Генерално посматрано, главни задатак у поступку оптимизације јесте одабир алгоритма који ће омогућити ефикасно решавање разматраног оптимизационог проблема и постизање задовољавајућих резултата.

Последње две деценије, у решавању инжењерских оптимизационих проблема најчешће се примењују метахеуристички алгоритми. Ови алгоритми имају могућност генерисања нових решења која су боља од претходно добијених, а иста морају бити у простору глобалног оптимума. Такође, предност ових алгоритама је у томе да могу прилично успешно избећи локални минимум пошто имају систем који их може извући из тог простора претраге. Две основне карактеристике метахеуристичких алгоритама јесу: интензивирање и диверсификација, које су познате и као експлоатација и истраживање. Диверсификација истражује глобални простор претраге, док се интензивирање концентрише на претрагу локалног региона и има систем који омогућава алгоритму да напусти простор локалног минимума. У процесу оптимизације, препоручљиво је постићи равнотежу између ове две карактеристике јер се код превелике диверсификације и премалог интензивирања обезбеђује веома брза конвергенција оптимизационог алгоритама, што доприноси већој вероватноћи да се алгоритам заглави у локалном минимуму. У оваквим случајевима, конвергенција је веома спора, па постизање равнотеже између ове две карактеристике; омогућава оптималне перформансе алгоритма.

Добро је позната чињеница да не постоји универзални оптимизациони алгоритам који може успешно решити разноврсне и сложене проблеме оптимизације. У зависности од врсте оптимизационог проблема, неки алгоритми су прилично успешни, а неки пак не. Ефикасност оптимизационих алгоритама се често тестира на познатим инжењерским benchmark проблемима. У таквим ситуацијама поређење DE алгоритма са метахеуристичким алгоритмима има смисла; метахеуристички алгоритми веома успешно решавају benchmark проблеме, достижући свој глобални оптимум на малом броју итерација и са веома брзом стопом конвергенције. У случају benchmark проблема, који су најчешће једноставније природе, модерни оптимизациони алгоритми могу у великом броју случајева надмашити једни друге. Код веома сложених оптимизационих проблема, одређени број алгоритама неће бити баш успешан. Примера ради, SARO алгоритам прилично ефикасно решава једноставније проблеме оптимизације, као што је приказано у раду [95].

5.4 Алгоритам диференцијалне еволуције (DE)

Алгоритам диференцијалне еволуције (DE) представља стохастички модел који симулира биолошку еволуцију [96]. Алгоритам диференцијалне еволуције припада групи хеуристичких алгоритама и базира се на директној претрази функције циља посредством популације потенцијалних решења. Концепт оптимизационог алгоритма DE јесте да се процес претраживања простора тј. процес у коме се генеришу нова потенцијална решења заснива на модификацији јединки тренутне популације посредством комбинације осталих

јединки из исте популације. На тај начин, ново решење се прихвата само у случају да у односу на старо, ово решење има повољнију вредност функције циља. С обзиром да је модификација постојећих решења сразмерна разлици два насумично одабрана решења, то се у почетној фази оптимизације дешавају велике осцилације у решењима, што за последицу има већу ширину претраге. У случају окупљања популације у близини оптимума решења, разлике између одређених решења постају мале, па ће у том случају и модификације постојећих решења бити мале, што за последицу има потпомагање локалног претраживања и конвергенцију ка оптимуму.

Упоређујући ДЕ алгоритам са другим еволуционим алгоритмима може се уочити да ДЕ задржава глобалну стратегију претраживања засновану на популацији. Опис ДЕ алгоритма дат је у радовима [97–99] У структури основног ДЕ алгоритма садржане су четири фазе: иницијализација, мутација, укрштање и селекција. Иницијализација је краткотрајан процес, док се остале три фазе понављају током процеса претраживања [100]. За i -ту јединку популације која припада g -тој генерацији, вектор потенцијалног решења може се изразити коришћењем релације (5.1)

$$\overrightarrow{group}_i^g = (\overline{X}_{i,1}^g, \overline{X}_{i,2}^g, \dots, \overline{X}_{i,s}^g) \quad , \quad i = 1, \dots, NP; g = 1, \dots, itermax \quad (5.1)$$

где су: s - број параметара јединке, NP - број јединки у популацији и $itermax$ - унапред дефинисани максимални број генерација.

Као и сви еволуциони алгоритми, ДЕ алгоритам у оквиру почетне фазе иницијализације врши генерисање насумичне почетне популације ($g=1$) која се састоји од NP вектора реалних бројева [101]. Сваки од вектора x_i представља потенцијалног кандидата за решење оптимizacionог проблема и садржи укупно D елемената означених са x_{ij} . За сваки од параметара који се оптимизује постоји опсег вредности између којих се дати параметар мора наћи, па се сходно томе иницијализација популације врши на начин описан једначином (5.2).

$$\overline{X}_{i,j}^{(1)} = \overline{X}_{\min,j} + \overrightarrow{rand}_{i,j} [0,1] \cdot (\overline{X}_{\max,j} - \overline{X}_{\min,j}) \quad i = 1, \dots, NP; j = 1, \dots, s \quad (5.2)$$

где су: $\overline{X}_{\min,j}$ и $\overline{X}_{\max,j}$ - доња и горња граница променљиве за j -ти вектор које су дефинисане одговарајућим ограничењима, $\overrightarrow{rand}_{i,j}$ - униформни насумично одабрани вектор из опсега бројева између 0 и 1, NP - укупан број јединки у популацији и s - укупан број параметара јединки. У циљу разумевања алгоритамских корака, потребно је дефинисати следеће појмове:

- Циљни вектор x_i представља хромозом тренутне генерације,
- Донорски вектор v_i представља мутирани вектор који је добијен као резултат процеса мутације,

– Пробни вектор представља вектор потомства који је добијен рекомбинацијом донорског и циљног вектора.

Током процеса мутације, циљ је формирање мутираног вектора $\overrightarrow{inter_group}_i^g$ који улази у наредну фазу укрштања. Сам процес мутације се састоји у додавању векторске разлике најбоље јединке популације NP према вектору i -те јединке прво из g -те генерације, а након тога се додају скалиране векторске разлике у виду две насумично одабране јединке из популације $r_1, r_2 \in [1, \dots, NP]$ том вектору [84]. На тај начин се врши генерисање донорског вектора, а описани поступак се може представити Једначином (5.3).

$$\overrightarrow{inter_group}_i^g = \overrightarrow{group}_i^g + F \times (\overrightarrow{bm}_{ibest}^g - \overrightarrow{group}_i^g) + F \times (\overrightarrow{group}_{r_1}^g - \overrightarrow{group}_{r_2}^g) \quad (5.3)$$

где је F фактор скалирања параметара алгоритма диференцијалне еволуције којим се врши фино претраживање простора потенцијалних решења и по правилу има вредност која је мања од један.

У циљу повећања разноврсности популације, након процеса мутације следи процес укрштања. У току овог процеса, претходно генерисани мутирани вектор се укршта са почетним вектором, у циљу стварања пробног вектора (\overrightarrow{U}_i^g) који има способност да побољша вредност функције циља [97]. Примена DE алгоритма подразумева да се операција укрштања примењује на сваки пар циљног вектора ($\overrightarrow{group}_{i,j}^g$) и њему одговарајућег мутантног вектора који се користи за генерисање пробног вектора. Дефиниција операције укрштања представљена је Једначином (5.4).

$$\overrightarrow{U}_i^g = \begin{cases} \overrightarrow{inter_group}_{i,j}^g & \text{if } (\overrightarrow{rand}_{i,j} [0,1] \leq CR) \text{ or } (j = j_{rand}) \\ \overrightarrow{group}_{i,j}^g & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.4)$$

где су: $CR \in [0,1]$ - вероватноћа укрштања, а $j_{rand} \in \{1, 2, \dots, D\}$ - насумично одабран индекс који обезбеђује да пробни вектор \overrightarrow{U}_i^g добије бар један од елемената донорског вектора v_i .

Селекција представља последњу фазу DE алгоритма у оквиру које се одлучује о томе да ли ће пробни вектор „опстати“ до следеће генерације или не [102]. На основу упоредних вредности функција циља за пробни и иницијални вектор, одређује се да ли ће пробни вектор заменити почетни вектор у популацији следеће генерације или ће јединке почетног вектора наставити еволуциони процес представљен Једначином (5.5). Овим је омогућена конвергенција ка бољим решењима, с обзиром на чињеницу да таква популација може послужити као база компонената за стварање нових пробних вектора у наредној итерацији

$$\overrightarrow{group}_i^{g+1} = \begin{cases} \overrightarrow{U}_i^g, & \text{if } f_{min}(\overrightarrow{U}_i^g) \leq f_{min}(\overrightarrow{group}_i^g) \\ \overrightarrow{group}_i^g, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.5)$$

На овај начин се осигурава да ће сваки хромозом из следеће генерације бити исти или бољи од њему одговарајућег из претходне итерације.

Представљени процес стварања нових генерација кроз процесе мутације, укрштања и селекције се понавља све док се не испуне услови који су дефинисани критеријумом заустављања. Критеријум заустављања заснива се на вредности функције циља и примењује се само у случајевима када је њена минимална вредност већ унапред позната. У општем случају, када минимална вредност функције циља није позната, алгоритам диференцијалне еволуције због чињенице да не предвиђа рачунање извода функције циља, не омогућава проверу конвергенције ка оптималном решењу, па тако није могуће утврдити да ли је добијена вредност функције циља најмања [100].

Структура DE алгоритма постаје јаснија када се исти представи у облику псеудокода у коме су сумирани сви описани кораци (видети Табелу 5.1).

Табела 5.1 Псеудокод DE алгоритма

Алгоритам 3. Псеудокод алгоритма DE

- 1: Одреди функцију циља
- 2: Иницијализовати популацију NP јединки ($group_{i,j}^g$ $i = 1, \dots, NP$ $j = 1, \dots, s$ $g = 1, \dots, itermax$)
- 3: **do while**
- 4: **for** $i=1$ to NP **do**
- 5: **for** $j=1$ to s **do**
- 6: $\vec{group}_{i,j} = \vec{X}_{min,j} + rand_{i,j} [0,1] \cdot (\vec{X}_{max,j} - \vec{X}_{min,j})$
- 7: **end for**
- 8: Почни са првим чланом популације / $i=1$
- 9: Процени функцију циља за $i=1$ ($val(1)=bestval=f_{min}$)
- 10: **for** $i=2:NP$
- 11: **if** ($val(i) < val(1)$) (сачувај боље оптималне вредности у свакој генерацији (итерација))
- 12: $ibest=i$;
- 13: $bestval= val(i)$
- 14: **end if**
- 15: **end for**
- 16: **while** ($itermax > iter$)
- 17: Попуни нову популацију најбољим чланом последње итерације
- 18: $bm_{ibest,j} = group(ibest,:)$

19: Процес мутације
20: **for** за сваку g -ту генерацију у j -тој јединки **do**
21: насумично генериши целе бројеве: $r_1, r_2 \in [1, NP]$ где је $r_1 \neq r_2 \neq i$
22: **for** сваки параметар i
23: $\overrightarrow{inter_group}_i^g = \overrightarrow{group}_i^g + F \times (\overrightarrow{bm}_{ibest}^g - \overrightarrow{group}_i^g) + F \times (\overrightarrow{group}_{r_1}^g - \overrightarrow{group}_{r_2}^g)$
24: Укрштање
25: Генериши дечји вектор $\overrightarrow{U}_{i,g}$ кроз операцију укрштања на основу Јед. (5.4)

26: **end for**
27: **end for**

28: Процес селекције
29: **if** јединка \overrightarrow{U}_i^g је боља од групе јединки i,g ($f_{\min}(\overrightarrow{U}_i^g) \leq f_{\min}(\overrightarrow{group}_i^g)$)
30: **then** замени јединку $\overrightarrow{group}_i^{g+1}$ по пробном вектору \overrightarrow{U}_i^g
31: **else** $\overrightarrow{group}_i^{g+1} = \overrightarrow{group}_i^g$
32: **end if**

33: **end for**
34: **end while**

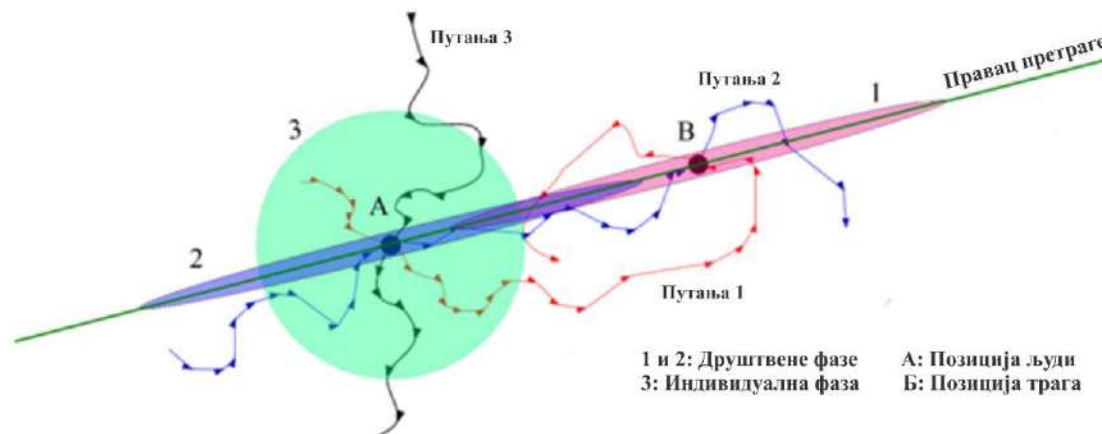
35: **return** најбољу јединку у популацији

5.5 Алгоритам претраге и спасавања (SARO)

Оптимизациони алгоритам за претрагу и спасавање (SARO) представља метахеуристички алгоритам који је инспирисан истраживачким понашањем људи током операција потраге и спасавања. Многа створења у природи живе у друштвима и неретко су у потрази за различитим циљевима као што су улов и проналажење извора хране. За реализацију ових активности користе се различите стратегије за претраживање. На сличан начин и људи врше претрагу нпр. код лова, у потрази за храном или у операцији претраге и спасавања. Претрага представља систематску операцију на бази расположивог људства, објеката и опреме код спасавања, извлачења и транспорта особа у невољи на безбедно место [95].

Према томе, методе претраге људи у операцијама претраге и спасавања садрже две фазе: индивидуалну и друштвену. Индивидуална фаза претраге, се врши без обзира на позицију и значај трагова које је неко већ пронашао. У друштвеној фази претраге, чланови групе врше претрагу на основу положаја пронађених трагова и њиховог значаја [88]. Постоје две врсте трагова:

1. Задржани траг - један члан групе је присутан у зони претраге и тражи око њега,
 2. Напуштени траг - члан групе који је пронашао траг оставио га је како би пронашао значајније трагове, али информације о овом трагу су доступне осталим члановима групе.
- Обе поменуте фазе људске потраге у операцијама претраге и спасавања приказане су на Слици 5.1.



Слика 5.1. Два типа људске претраге у операцијама претраге и спасавања [88]

Локације члана групе и трагова су означене тачкама А и В, респективно (видети Сliku 5.2). Путања 1, Путања 2 и Путања 3 представљају путање за које се претпоставља да је изгубљена особа вероватно прошла [88]. У друштвеној фази, човек на позицији А бира правац претраге на основу позиције трага В. Значајнији трагови повећавају вероватноћу проналаска изгубљене особе, подручје у коме има значајнијих трагова биће одабрано у правцу претраге АВ. Практично, ако има више значајнијих трагова у области 1 у односу на област 2, бира се област 1. У супротном, област 2 се бира као област претраге. На приказаном примеру на Слици 5.1 и Путања 1 и Путања 2 пролазе кроз тачке А и В. У случају да је изгубљена особа прошла Путању 1 или Путању 2 ова једноставна стратегија ће повећати шансе за проналажење значајнијих трагова у друштвеној фази.

Код математичког модела SARO алгоритма за решавање оптимизационих проблема, положај човека одговара решењу проблема оптимизације и траг пронађен на овој позицији указује на ефикасност приликом одређивања погодног решења. Боље решење представља значајнији траг и обрнуто. Позиције трагова на левој страни се чувају у меморијској матрици (М), док се положаји људи чувају у матрици положаја (матрица Х), чије су димензије једнаке [88].

Матрица трагова (матрица С) је матрица који у себи садржи позиције пронађених трагова на основу матрица М и Х и приказана је Једначином 5.6. Све три матрице (Х, М и С) се ажурирају у свакој фази људске претраге.

$$C = \begin{bmatrix} X \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N1} & \dots & c \\ M_{11} & \dots & M_{1D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N1} & \dots & X_{ND} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

На основу претходних објашњења и узимајући у обзир случајни траг међу пронађеним траговима, правац претраге се добија коришћењем Једначине (5.7)

$$SD_i = (X_i - C_k), \quad k \neq i \quad (5.7)$$

где су: X_i - позиција i -тог бића, C_k - позиција k -тог трага и SD_i - правац потраге i -тог бића. k је насумични цео број између 1 и $2N$.

Као што је већ поменуто, ако је разматрани траг значајнији од трага који се односи на тренутну позицију (вредност функције циља за решење C има већу вредност од вредности функције циља за решење X (видети Сл. 5.1), врши се претрага области око смера SD_i и око положаја тог трага (област 1 на Слици 5.1) [95]. У супротном, претрага ће се наставити око тренутне позиције заједно са SD_i смером (област 2 на Слици 5.1). У циљу добијања правца претраге за друштвену фазу, користи се Једначина (5.8).

$$X'_{i,j} = \begin{cases} \begin{cases} C_{k,j} + r_1 \times (X_{i,j} - C_{k,j}) & \text{if } f(C_k) > f(X_i) \\ X_{i,j} + r_1 \times (X_{i,j} - C_{k,j}) & \text{otherwise} \end{cases} & \text{if } r_2 < SE \text{ или } j = j_{rand} \quad j = 1, \dots, D \\ X_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.8)$$

где су: $X_{i,j}$ - нова позиција j -те димензије за i -то биће; $C_{k,j}$ - позиција j -те димензије за k -ти траг; $f(C_k)$ и $f(X_i)$ су вредности функције циља за решења C_k и X_i , респективно.

Код индивидуалне фазе, људи претражују свој тренутни положај и идеја повезивања различитих трагова у друштвеној фази се користи у оквиру ове фазе. Нова позиција i -тог човека се добија се коришћењем Једначине (5.9).

$$X'_i = X_i + r_3 \times (C_k - C_m), \quad i \neq k \neq m \quad (5.9)$$

где су k и m насумични цели бројеви између 1 и $2N$.

Решења која су добијена коришћењем друштвене или појединачне фазе треба да се налазе у простору решења, а уколико су ван од тог простора, потребно их је модификовати. За измену нове позиције i -тог бића користи се Једначина (5.10).

$$X'_{i,j} = \begin{cases} (X_{i,j} + X_j^{\max}) / 2 & \text{if } X'_{i,j} > X_j^{\max} \\ (X_{i,j} + X_j^{\min}) / 2 & \text{if } X'_{i,j} < X_j^{\min} \end{cases}, \quad j = 1, \dots, D \quad (5.10)$$

где су X_j^{\max} и X_j^{\min} - вредности максималног и минималног прага за j -ту димензију, респективно.

У оквиру сваке итерације, чланови групе вршиће претрагу према овим двама фазама и уколико је након сваке фазе вредност функције циља на позицији $\mathbf{X}'_i (f(\mathbf{X}'_i))$ већа од претходне $f(\mathbf{X}'_i)$, претходна вредност позиције \mathbf{X}'_i биће упамћена на случајном положају у меморијској матрици (M) коришћењем Једначине (5.11). Ова позиција биће прихваћена као нова позиција уз помоћ Једначине (5.12). У супротном, ова позиција остаје и меморија се неће ажурирати [88].

$$M_n = \begin{cases} X_i & \text{if } f(\mathbf{X}'_i) > f(\mathbf{X}_i) \\ M_n & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.11)$$

$$X_i = \begin{cases} X'_i & \text{if } f(\mathbf{X}'_i) > f(\mathbf{X}_i) \\ X_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.12)$$

где су M_n - положај n -тог ускладиштеног трага у меморијској матрици M, а n - насумични цео број у распону између 1 и N .

У операцијама потраге и спасавања време представља веома важан фактор, јер људи који су се изгубили могу бити повређени, и свако кашњење тимова за потрагу и спасавање може довести до њихове смрти [88,95]. Према томе, овакве операције морају бити изведене на начин који омогућава да се претрага највећег простора изврши у најкраћем могућем року. За моделирање оваквог понашања, број неуспешне претраге (USN) је на почетку подешен на 0 за сваког члана групе за претрагу. Кад год неко од чланова групе пронађе значајније трагове у првој или другој фази претраге, USN се поставља на 0 за тог члана; у супротном, биће увећан за 1 поен као што је приказано Једначином (5.13).

$$USN_i = \begin{cases} USN_i + 1 & \text{if } f(\mathbf{X}'_i) < f(\mathbf{X}_i) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.13)$$

где USN_i означава колико пута i -ти човек није успео да пронађе неки значајнији траг. У случају када је USN за човека већи од MU , он/она иде на другу позицију у простору за претрагу [88]. У циљу решавања ограниченог проблема оптимизације, за изводљиво решење, уколико је $USN > MU$, тренутно решење се замењује случајним решењем у простору претраге користећи у том случају Једначину (5.14).

$$X_{i,j} = X_j^{\min} + r_4 \times (X_j^{\max} - X_j^{\min}), \quad j = 1, \dots, D \quad (5.14)$$

где r_4 представља случајни број са униформном дистрибуцијом у распону између 0 и 1 .

На основу наведених корака, псеудокод овог алгоритма дат је у наставку (видети Табелу 5.2) [88].

Табела 5.2 Псеудокод SARO алгоритма

Алгоритам 4. Псеудокод алгоритма SARO

- 1: Насумично иницијализујте популацију од $2N$ решења равномерно распоређени у опсегу $[X_j^{\min}, X_j^{\max}]$, $j = 1, \dots, D$
 - 2: Сортирај решења по опадајућем редоследу и пронађи тренутно најбољу позицију (X_{best})
 - 3: Користите прву половину сортираних решења за људске позиције (X), и остале за матрицу меморије (M)
 - 4: Дефинисати параметре алгоритма и поставити $USN_i = 0$ где је $i = 1, \dots, N$
 - 5: **while** критеријум заустављања није задовољен **do**
 - 6: **for** $i = 1$ до N
 - 7: Ажурирајте матрицу трагова (C)
 - 8: **if** $\text{rand} < 0,5$ **do**
 - 9: Примените друштвену фазу и израчунајте нову позицију i -тог бића
 - 10: **else**
 - 11: Примените појединачну фазу и израчунајте нову позицију о i -тог бића
 - 12: **end if**
 - 13: Контрола границе нове позиције i -тог бића
 - 14: Ажурирај n -ту меморију и позицију i -тог бића
 - 15: Ажурирај USN_i Насумично генериши N почетних решења $X_{i,G} = \{x_{i,G}^1, x_{i,G}^2, \dots, x_{i,G}^D\}$ 16:
 - 16: **if** $USN_i > MU$ и X_i је изводљиво решење **do**
 - 17: X_i је замењен случајним решењем у простору за претрагу и $USN_i = 0$
 - 18: **else if** $USN_i > MU$ и X_i је неизводљиво решење **do**
 - 19: X_i је замењен решењем са минималним степеном кршења ограничења у меморијској матрици и заузима његово место $USN_i = 0$
 - 20: **end if**
 - 21: Примени стратегију поновног покретања
 - 22: **end for**
 - 23: Пронађи тренутно најбољу позицију и ажурирајте X_{best}
 - 24: **end while**
 - 25: Врати X_{best}
-

5.6 Формулација проблема оптимизације положаја зона опасности од појаве пожара

Циљ овог одељка јесте одређивање приближне конфигурације високорегалног складишта (layout-a) са свим припадајућим елементима на основу оптимизованих локација зона опасности од пожара. Поменута конфигурација треба да обезбеди унапређење постојећих процедура и одговарајући ниво безбедности људства и објекта. Поступак одређивања приближне конфигурације високорегалног складишта обавља се кроз неколико фаза:

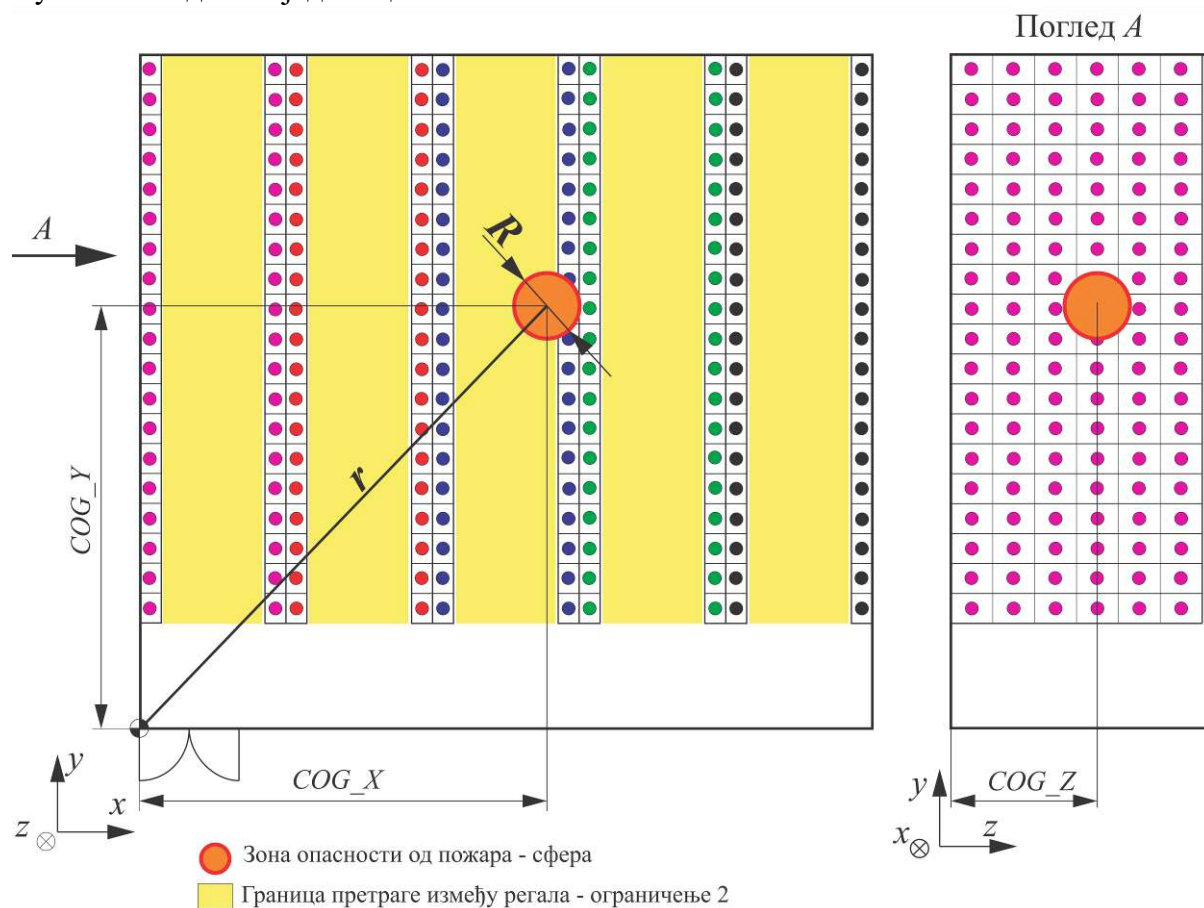
- дефинисање расположивог броја конфигурација складишта - layout-a,
- одређивање укупног броја расположивих распореда регала у складишту на основу материјала који се складишти,
- дефинисање потребног броја случајева процентуалне испуњености регала транспортним јединицама.
- дефинисање функције циља и ограничења,
- примена оптимизационог алгорита,
- обрада резултата добијених оптимизацијом.

Примена оптимизационог алгорита представља главну фазу у поступку одређивања приближне конфигурације, којом се решава низ унапред постављених задатака са циљем добијања коначних параметара распореда у складишту. Одређивање приближне конфигурације складишта јесте одређивање најбољег решења у циљу постизања што боље конфигурације и параметара кроз низ поновљених итеративних поступака. Имајући у виду да поступак оптимизације убрзава прорачун комплексних задатака и проблема, не чуди чињеница да примена оптимизационих алгорита бележи све већу експанзију у последњих пар деценија.

У наставку овог поглавља биће представљен проблем оптималне конфигурације високорегалног складишта са аспекта безбедности од пожара тј. биће детаљно изложена процедура добијања оптималне конфигурације складишта коришћењем теорије оптимизације. За решавање поменутог проблема биће примењена два оптимизациона алгорита: алгоритам диференцијалне еволуције (DE) и алгоритам претраге и спасавања (SARO). Ефикасност оптимизационих алгорита провериће се кроз адекватне нумеричке примере.

5.6.1 Анализа оптимизационог проблема

Предмет анализе јесте оптимална конфигурација високорегалног складишта са аспекта максимизације положаја зоне опасности од пожара. Као и у нумеричким примерима приказаним у поглављу 4, укупан број регала у складишту је 10, максимални број складишних јединица по регалу је 120 (укупно 1200), док је број материјала којим су испуњене складишне јединице 5.



Слика 5.2 Приказ високорегалног складишта са параметрима који се оптимизују

За потребе анализе оптимизационог проблема са становишта локације потенцијалне зоне опасности од пожара, уведен је глобални тродимензионални координатни систем $Oxyz$. Одговарајућим растојањима по све три осе координатног система од почетне тачке (видети Сliku 5.2), дефинише се положај зоне опасности пожара у виду вектора r , где су:

- COG_X - положај зоне опасности од пожара по x -оси
- COG_Y - положај зоне опасности од пожара по y -оси
- COG_Z - положај зоне опасности од пожара по z -оси

5.6.2 Пројектни параметри

У примерима одређивања оптималне конфигурације високорегалног складишта са аспекта максимизације положаја потенцијалне зоне опасности од пожара оптимизује се дванаест пројектних променљивих: $L_x, {}^n P_r, n_{c1}, n_{c2}, n_{c3}, n_{c4}, n_{c5}, n_{c6}, n_{c7}, n_{c8}, n_{c9}, n_{c10}$. Вектор пројектних променљивих може се представити на следећи начин:

$$\mathbf{X} = [L_x, {}^n P_r, n_{c1}, \dots, n_{cN}] \quad (5.15)$$

где је L_x - број layout-а (укупно 4), ${}^n P_r$ - број пермутације која представља случај распореда регала према материјалу којим је испуњена складишна јединица, а n_{c1}, \dots, n_{cN} ($N=1, \dots, 10$) - представљају случај испуњености регала складишним јединицама од 20 расположивих случајева.

Како је број регала у складишту 10 и број регала испуњених истим материјалом 2, то се укупан број могућих распореда регала може одредити коришћењем израза за израчунавање пермутација без понављања (5.16)

$${}^n P_r = \frac{10!}{2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2!} = 113400 \quad (5.16)$$

За сваку од пројектних променљивих x_j неопходно је дефинисати доњу x_j^{lb} и горњу x_j^{ub} границу:

$$x_j = [x_j^{lb}, x_j^{ub}], \forall x_j \in \mathbf{X}, j = 1, \dots, 12 \quad (5.17)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_j^{lb} \\ x_j^{ub} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 113400 & 20 & 20 & 20 & 20 & 20 & 20 & 20 & 20 & 20 & 20 \end{bmatrix}$$

након чега се дефинише функција циља са припадајућим ограничењима.

5.6.3 Функција циља и ограничења

Након избора пројектних променљивих неопходно је извршити дефинисање функције циља коришћењем следеће релације:

$$\text{Maximize} \left[\left(r = \sqrt{COG_X^2 + COG_Y^2 + COG_Z^2} \right) + \sum g \cdot k \right] [m] \quad (5.18)$$

Функција циља представљена је релацијом (5.18) и састоји се из два дела. Први члан у функцији циља одређује положај потенцијалне зоне опасности од пожара, док други члан дефинише казнену функцију којом су у обзир узета задата ограничења. Како би се испоштовали захтеви при првом пролазу пројектовања складишта уведен је вектор \mathbf{g} који је димензија $1 \times n$ где n представља број унетих ограничења. Ограничења која су

дефинисана при формирању овог оптимизационог проблема, тј. ограничења која одабрани параметри морају да задовоље су следећа:

- не сме постојати више од два регала који су испуњеним складишним јединицама са истим распоредом попуњености;
- положај потенцијалне зоне опасности (центар сфере) не сме бити у коридорима.

У случају да неки од ових захтева тј. ограничења није испуњен, сума чланова вектора \mathbf{g} биће већа од нуле. Како је сума чланова вектора \mathbf{g} већа од нуле, она утиче на смањење стварне вредности функције циља што ће оптимизационом алгоритму наложити да такво решење у следећој итерацији одбаци као неадекватно. Ако су испуњена сва задата ограничења, сума чланова вектора \mathbf{g} биће једнака нули па ће таква решења бити фаворизована од стране оптимизационог алгоритма. У једначини (5.18), коефицијент k представља множитељ суме чланова вектора \mathbf{g} и служи да циљано увећа збир прекршених ограничења довољно да вредност функције циља не буде конкурентна решењима која задовољавају задате критеријуме. Вредност коефицијента k у овом случају износи 10^4 .

Ограничење 1 - представља ограничење које се односи на дозвољени број регала који су попуњени на исти начин од 20 расположивих. Број регала је лимитиран на два.

Ограничење 2 - представља дозвољене границе претраге простора између регала и коридора. Имајући у виду да је ширина коридора четири метра, граница претраге је умањена за 10% као што је приказано на Слици 5.2. Код Layout-a 1 и 3 горња и доња граница по x -оси су једнаке, док су случају Layout-a 2 и 4 горња и доња граница једнаке по y -оси.

Layout 1

Доња граница - $RZLx = [1 \ 6.7 \ 12.4 \ 18.1 \ 23.8]$

Горња граница - $RZLx = [4.6 \ 10.3 \ 16 \ 21.7 \ 27.4]$

Layout 2

Доња граница - $RZLy = [1 \ 6.7 \ 12.4 \ 18.1 \ 23.8]$

Горња граница - $RZLy = [4.6 \ 10.3 \ 16 \ 21.7 \ 27.4]$

Layout 3

Доња граница - $RZLx = [1 \ 6.7 \ 12.4 \ 18.1 \ 23.8]$

Горња граница - $RZLx = [4.6 \ 10.3 \ 16 \ 21.7 \ 27.4]$

Layout 4

Доња граница - $RZLy = [1 \ 6.7 \ 12.4 \ 18.1 \ 23.8]$

Горња граница - $RZLy = [4.6 \ 10.3 \ 16 \ 21.7 \ 27.4]$

6. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

На основу параметара који се односе на локацију транспортних јединица одређених спровођењем процедуре приказане на Слици 3.2, тежинских коефицијената добијених коришћењем COPRAS методе (видети Слику 3.1) и инкорпорирањем поменутих параметара у алгоритам COG, добијају се локације потенцијалних зона опасности од пожара у високорегалном складишту у виду координата X , Y , Z . Параметар r представља растојање потенцијалне зоне опасности од нулте тачке, док је радијус зоне опасности означен са R дефинисан као растојање центра зоне опасности од пожара, тј. центра сфере до најближе складишне јединице (видети Слику 5.2). Радијус зоне опасности се дефинише тако да обухвата најближе место где пожар заправо може да почне. У овом случају, запремина у виду сфере практично обухвата складишне јединице на које је најнеповољније, са становишта безбедности и заштите на раду, да иницијална варница или неки други извор паљења падне и изазове пожар.

Како се може видети у раду [42], гума приликом сагоревања емитује велику количину дима и материја штетних по здравље људи, па из разлога безбедности, видљивости и лакше евакуације из складишта (видети Слику 4.2), транспортне јединице са гумом заузимају последња два регала што представља један од разматраних случајева. У циљу добијања што прецизнијих и поузданијих резултата, извршен је прорачун потенцијалних зона опасности од пожара и за случај када складишне јединице испуњене гумом заузимају прва два регала. Важно је напоменути да приликом прорачуна поменутих зона опасности, нису разматрани економски и логистички фактори.

У наставку поглавља приказане су све разматране варијанте распореда у складишту (Одељак 4), са различитим случајевима испуњености регала складишним јединицама. Резултати симулације су приказани у виду табела, где лева колона представља случај када се користе тежински коефицијенти везани за емисију w_{ei} , а десна колона случај када се за прорачун зона опасности користе тежински коефицијенти везани за процес сагоревања w_{ci} .

6.1 Варијанта 1 - испуњеност складишта 100%

6.1.1 Складиште испуњено са 4 врста материјала

Резултати и дискусија у вези ове варијанте распореда где су разматрана прва два случаја распореда у складишту, дати су у оквиру поглавља 4.1.1.

6.1.2 Складиште испуњено са 5 врста материјала

- **LAYOUT 1** (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)

Табела 6.1 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 1 - 100%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
17,5	16	4,8	23,72	1	13,9	16	4,8	21,22	2,36

● дрво
● картон
● иверица
● PVC пластика
● гума

На основу резултата симулације приказаних у Табели 6.1 може се уочити следеће:

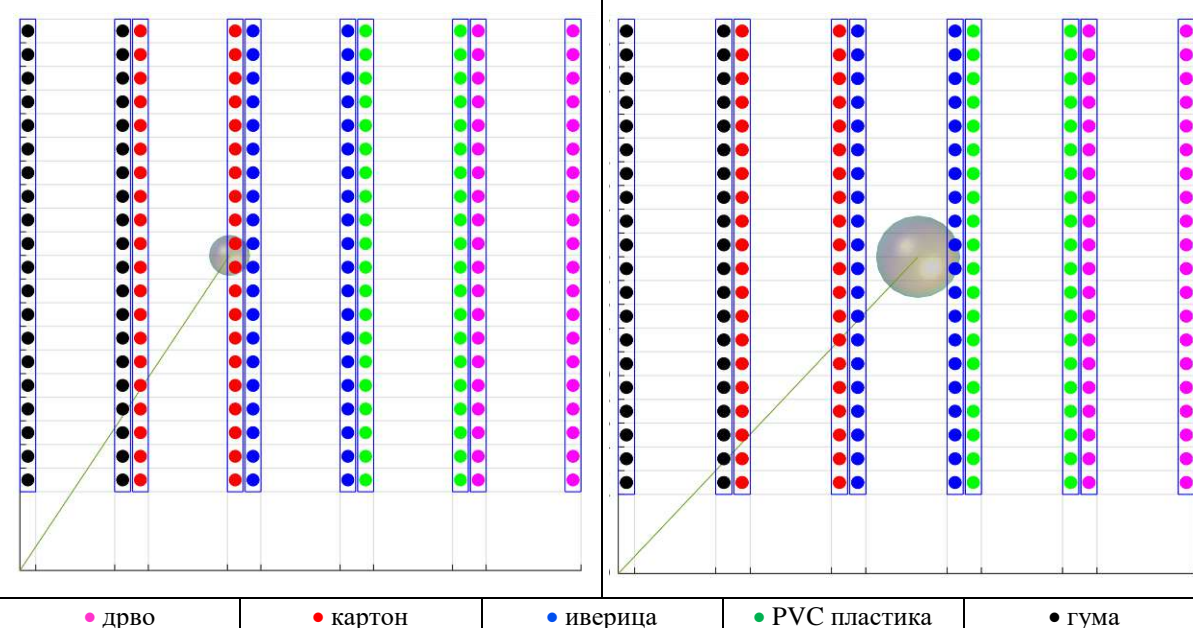
- Код прорачуна положаја потенцијалне зоне опасности од пожара у оба случаја није дошло до промене координате по оси Y .
- Сфера која представља потенцијалну зону опасности од пожара, у случају коефицијената везаних за сагоревање, налази се на средини коридора, што је последица приближних вредности тежинских коефицијената везаних за сагоревање.

- Сфера која представља зону опасности од пожара је у случају емисије у подручју регала са PVC пластиком, док је у случају сагоревања сфера ближа регалима са иверицом.

• **LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.2 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 1 - 100%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
10,6	16	4,8	19,19	1,04	14,8	16	4,8	21,77	2,08



● дрво
● картон
● иверица
● PVC пластика
● гума

Анализирајући резултате симулације приказане у Табели 6.2 може се уочити следеће:

- Као и у претходној табели, приликом прорачуна положаја потенцијалне зоне опасности од појаве пожара у оба случаја није дошло до промене координата по осама Y и Z .
- Због доминантног тежинског коефицијента везаног за гуму, зона опасности од пожара је ближа регалима попуњеним складишним јединицама које садрже гуму тј. дошло је до промене координате X .
- Приликом одређивања положаја потенцијалне зоне опасности од пожара коришћењем тежинских коефицијената везаних за сагоревање, иста заузима положај близак средишњој линији коридора, што је последица уједначене расподеле између тежинских коефицијената везаних за сагоревање.
- Сфера која представља зону опасности од пожара у случају емисије у близини је регала са картоном, док је у случају сагоревања сфера ближа регалима са иверицом.

• **LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају горња два регала)**

Табела 6.3 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају горња два регала (Layout 2 - 100%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
16	17,5	4,8	23,72	1	16	14,8	4,8	21,77	2,08

• дрво	• картон	• иверица	• PVC пластика	• гума
--------	----------	-----------	----------------	--------

Разматрајући резултате добијене симулацијом, а који су представљени у оквиру Табеле 6.3, може се закључити следеће:

- Услед промене оријентације регала из вертикалног у хоризонтални положај, у првом случају је дошло је до промене координата из X у Y и обратно, у односу на први случај у Табели 6.1.
- Услед промене оријентације регала из вертикалног положаја у хоризонтални, у другом случају је дошло је до промене координата X у Y и обратно у односу на Табелу 6.2.
- Као последица коришћења приближних вредности тежинских коефицијената везаних за сагоревање, положај потенцијалне зоне опасности од пожара услед сагоревања налази се на средини коридора.
- Сфера која представља зону опасности од пожара је у случају емисије у подручју регала са PVC пластиком и иверицом, док је у случају сагоревања сфера ближа регалима са иверицом.

• **LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају доња два регала)**

Табела 6.4 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{cis} за случај када складишне јединице са гумом заузимају доња два регала (Layout 2 - 100%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
16	10,6	4,8	19,19	1,04	16	14,8	4,8	21,77	2,08

• дрво	• картон	• иверица	• PVC пластика	• гума
--------	----------	-----------	----------------	--------

На основу резултата добијених симулацијом који су представљени у Табели 6.4, може се констатовати следеће:

- Због промене оријентације регала из вертикалног у хоризонтални положај, код другог случаја је дошло до промене вредности координата из X у Y , у поређењу са првим случајем у Табели 6.2.
- Услед промене оријентације регала из вертикалног положаја у хоризонтални, код другог случаја је дошло је до промене промене координата из X у Y и обратно у односу на други случај у Табели 6.3.
- Сфера која представља зону опасности од пожара је у случају емисије у подручју регала са картоном и иверицом, док у случају сагоревања сфера заузима положај између регала са иверицом.

• **LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)**

Табела 6.5 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{cis} за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 3 - 100%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
15,9	15,6	4,8	22,23	1,23	12,6	15,2	4,8	19,79	1,18

На основу Табеле 6.5 у којој су садржани резултати симулације у виду просторних координата потенцијалних зона опасности од појаве пожара, може се закључити следеће:

- Због распореда регала у складишту, где поред регала са вертикалном оријентацијом постоји и један регал који је оријентисан хоризонтално, дати пример се не може поредити са претходним везаним за Layout 1 и 2.
- Због доминантног тежинског коефицијента који је везан за емисију штетних продуката сагоревања $w_{kl}=0.45105$, зона опасности од пожара у првом случају биће оријентисана ка регалима који су попуњени складишним јединицама са гумом.
- У случају Layout-а 3 и тежинских коефицијената који се тичу сагоревања, а који су приближних вредности, положај зоне опасности од пожара је оријентисан ка регалима који су испуњени иверицом. За разлику од претходна два карактеристична распореда регала, у овом случају позиција зоне опасности од пожара је померена у односу на средишњу линију коридора.
- Сфера која представља зону опасности од појаве пожара је у случају емисије у подручју регала са PVC пластиком.

• **LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.6 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{cis} за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 3 - 100%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
11,4	13,1	4,8	17,36	1,03	13,2	15,5	4,8	20,36	1,68

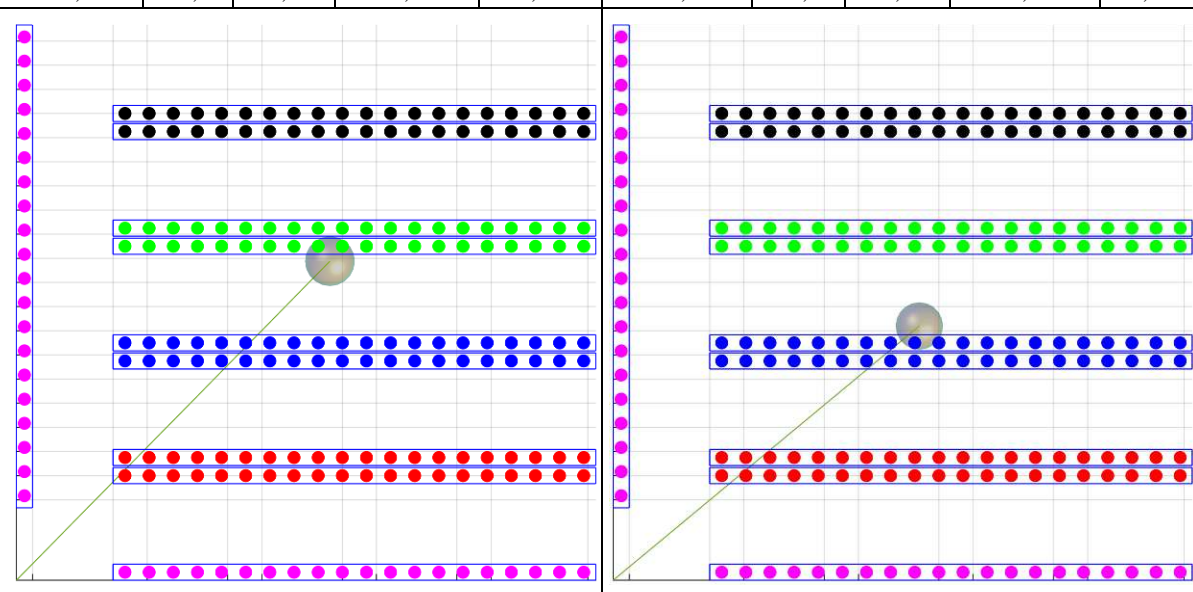
Анализом резултата симулације приказаних у Табели 6.6 може се уочити следеће:

- У односу на претходну табелу, код прорачуна положаја потенцијалне зоне опасности у првом случају везаном за емисију штетних продуката, дошло је до значајне промене координата X и Y , као последица премештаја гуме из крајњих регала у почетне регале. Координата по оси Z у оба случаја је остала непромењена.
- Због доминантног утицаја тежинског коефицијента w_{e5} везаног за гуму, зона опасности од пожара је ближа регалима попуњеним складишним јединицама које садрже гуму, што је и разлог промене координата по X и Y оси.
- Као последица коришћења приближних вредности тежинских коефицијената везаних за сагоревање, положај потенцијалне зоне опасности од појаве пожара услед сагоревања налази се у близини средишне линије коридора.
- Сфера која представља зону опасности од појаве пожара је у оба случаја лоцирана код регала са иверицом

• **LAYOUT 4** (складишне јединице са гумом заузимају горња два хоризонтална регала)

Табела 6.7 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 4 - 100%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
15,6	15,8	4,8	22,23	1,24	15,2	12,6	4,8	19,79	1,18



• дрво	• картон	• иверица	• PVC пластика	• гума
--------	----------	-----------	----------------	--------

На основу Табеле 6.7 у којој су садржани резултати симулације у виду просторних координата потенцијалних зона опасности од појаве пожара, може се закључити следеће:

- Због специфичног распореда регала у складишту, где поред регала са хоризонталном оријентацијом постоји и један регал који је оријентисан вертикално, дати пример се не може поредити са резултатима везаним за Layout 1 и 2.
- Због доминантног тежинског коефицијента који је везан за емисију штетних продуката сагоревања $w_{e5}=0.45105$, положај зоне опасности од пожара у првом случају је оријентисан ка регалима који су попуњени складишним јединицама са гумом.
- У случају Layout-а 3 и тежинских коефицијената који се тичу сагоревања, а који су приближних вредности, положај зоне опасности од пожара је оријентисан ка регалима који су испуњени иверицом. За разлику од претходна два карактеристична распореда регала, у овом случају позиција зоне опасности од пожара је померена у односу на средишњу линију коридора.

- **LAYOUT 4** (складишне јединице са гумом заузимају вертикални и први хоризонтални регал)

Табела 6.8 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 4 - 100%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
13,1	11,4	4,8	17,36	1,03	15,5	13,2	4,8	20,36	1,68

• дрво	• картон	• иверица	• PVC пластика	• гума
--------	----------	-----------	----------------	--------

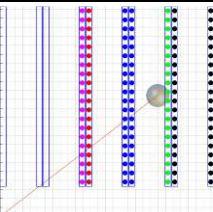
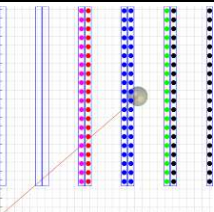
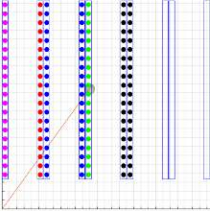
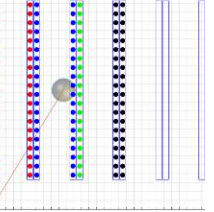
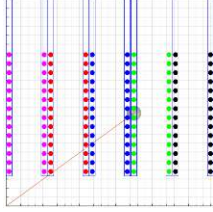
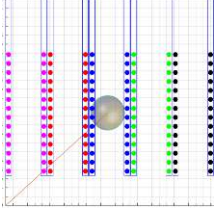
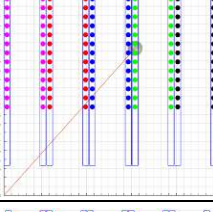
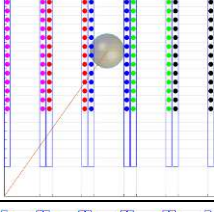
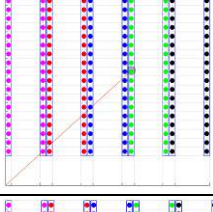
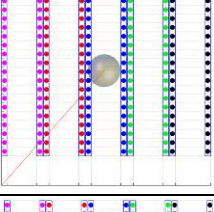
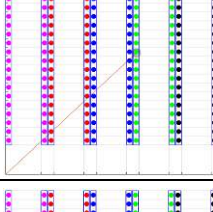
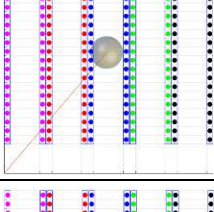
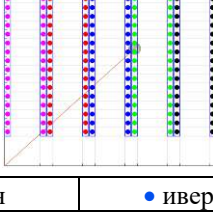
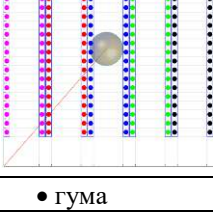
На основу Табеле 6.8 у којој су садржани резултати симулације у виду просторних координата потенцијалних зона опасности од појаве пожара, може се уочити следеће:

- Резултате који су добијени у датом примеру није могуће поредити са резултатима везаним за Layout 1 и 2, због другачије оријентације регала у самом складишту.
- У односу на претходну варијанту распореда, због коришћења коефицијента везаног за емисију штетних продуката сагоревања $w_{e5}=0.45105$, положај зоне опасности од пожара у првом случају је промењен тј. уочљива је промена координата по осама X и Y , као и промена радијуса сфере.
- У другом случају, код примене коефицијената везаних за сагоревање, вредност координате по оси Y је промењена.
- У оба случаја, сфера која представља потенцијалну зону опасности од пожара позиционирана је у близини регала испуњених складишним јединицама са иверицом.

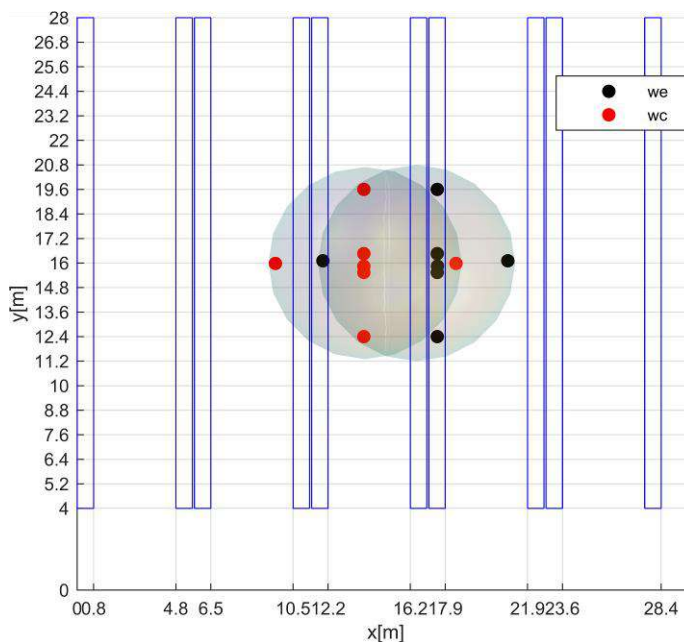
6.2 Варијанта 2 - укупна испуњеност складишта 70%

- LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)

Табела 6.9 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 1 (гума у регалима 9 и 10)

Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	
1.1	20,94	16,11	5,05	26,42	1,55		1.2	18,42	15,98	4,76	24,39	1,33		
2.1	11,95	16,11	5,05	20,05	0,75		2.2	9,64	15,98	4,76	18,67	1,58		
3.1	17,51	12,40	4,80	21,46	1		3.2	13,94	12,40	4,80	18,66	2,36		
4.1	17,51	19,60	4,80	26,29	1		4.2	13,94	19,60	4,80	24,05	2,36		
5.1	17,51	15,54	3,39	23,42	0,62		5.2	13,94	15,54	3,39	20,88	2,23		
6.1	17,51	16,46	6,21	24,03	0,63		6.2	13,94	16,46	6,21	21,57	2,23		
7.1	17,52	15,85	4,88	23,62	0,84		7.2	13,94	15,84	4,87	21,10	2,31		
● дрво			● картон			● иверица			● PVC пластика			● гума		

На основу резултата и илустрација (видети Табелу 6.9) очљиво је да се променом тежинских коефицијената мења положај зона опасности због разлике у вредностима самих тежинских коефицијената. Поменута разлика у тежинском коефицијенту за последицу има да код свих варијанти у првој колони, зона опасности гравитира ка регалима у којима је смештена гума, што говори у прилог томе да ширина и позиција зоне опасности зависи од распореда и количине материјала у складишту.



Слика 6.1 Графички приказ складишта за Layout 1 (гума у регалима 9 и 10)

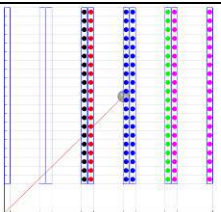
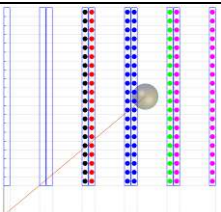
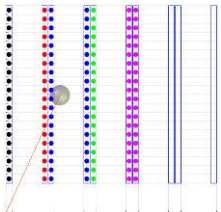
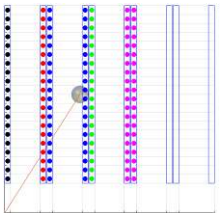
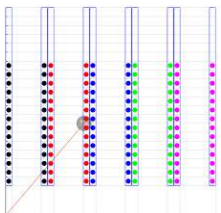
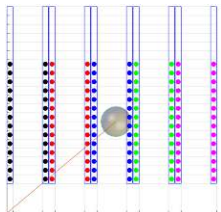
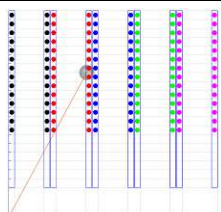
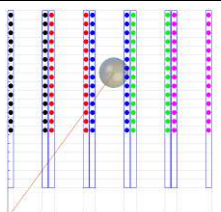
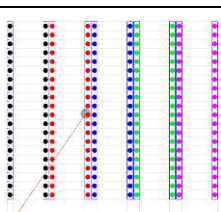
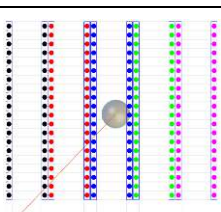
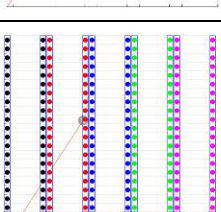
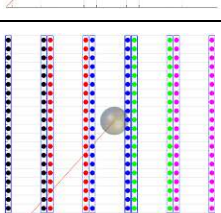
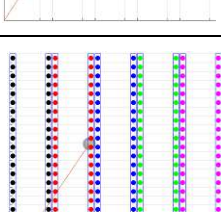
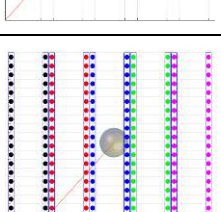
На основу резултата добијених коришћењем описане методе, а изложених у Табели 6.9, може се приметити да у случају када су складишне јединице насумично распоређене унутар складишта (варијанта 7.1 и 7.2) позиција зоне опасности је између зона опасности одређених у екстремним случајевима (варијанта 1.2, 2.2 итд), што је поткрепљено следећим запажањима:

- координата X код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност X координате код парова 1.1 и 2.1, односно 1.2 и 2.2, респективно;
- координата Y код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност Y координате код парова 3.1 и 4.1, односно 3.2 и 4.2;
- координата Z код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност Z координате код парова 5.1 и 6.1, односно 5.2 и 6.2.

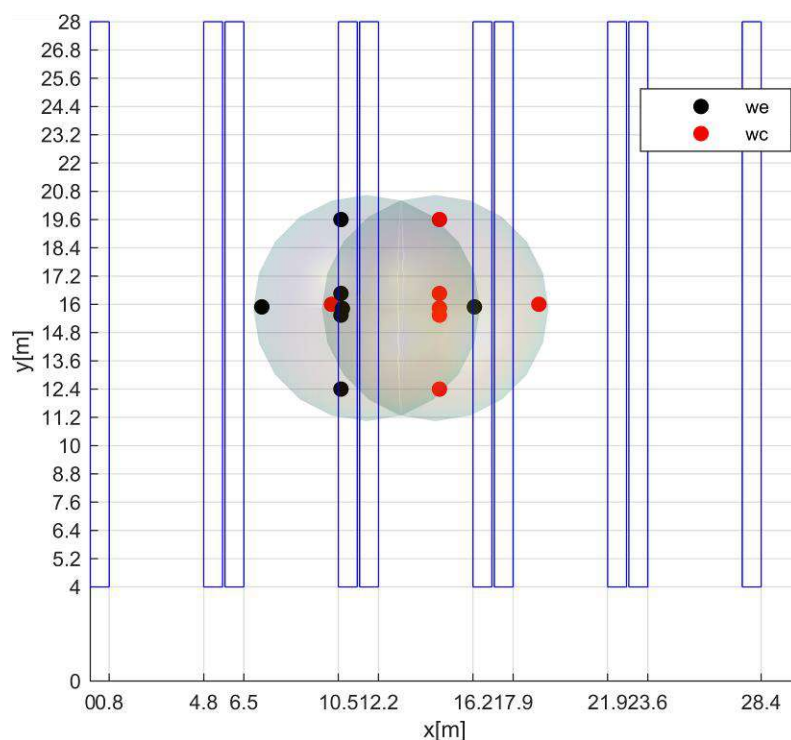
На основу добијених позиција приказаних у Табели 6.9 формиране су две сфере (Слика 6.1), које у себи садрже претходно наведене позиције зона опасности ($X=16.5\text{ m}$; $Y=16\text{ m}$; $Z=4.8\text{ m}$; $R=4.8\text{ m}$ и $X=14\text{ m}$; $Y=16\text{ m}$; $Z=4.8\text{ m}$; $R=4.8\text{ m}$) и исте заједно представљају целокупни простор који обухвата и екстремне и насумичне варијанте расподеле материјала унутар посматраног високорегалног складишта.

• **LAYOUT 1** (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)

Табела 6.10 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 1 (гума у регалима 1 и 2)

Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	
1.1	16,26	15,89	4,56	22,74	0,83		1.2	18,99	16	4,82	24,83	1,78		
2.1	7,26	15,89	4,56	17,48	1,38		2.2	10,21	16	4,82	18,99	1,19		
3.1	10,61	12,4	4,8	16,32	1,04		3.2	14,78	12,4	4,8	19,29	2,08		
4.1	10,61	19,6	4,8	22,29	1,04		4.2	14,78	19,6	4,8	24,54	2,08		
5.1	10,61	15,54	3,39	18,82	0,69		5.2	14,78	15,54	3,39	21,44	1,93		
6.1	10,61	16,46	6,21	19,58	0,69		6.2	14,78	16,46	6,21	21,12	1,93		
7.1	10,67	15,82	4,88	19,08	0,87		7.2	14,77	15,84	4,88	21,66	2,02		
● дрво			● картон			● иверица			● PVC пластика			● гума		

За разлику од претходног случаја, може се приметити да је зона опасности од пожара ближа нултој координати, тј. улазу/излазу из складишта. Ова ситуација се може објаснити тиме што гума има високу вредност тежинског коефицијента, с обзиром да је њена позиција сада ближа улазу/излазу из складишта, тиме је и зона опасности такође ближа улазу/излазу. Како је већ раније утврђено да гума емитује високи ниво штетних материја, што је и разлог високе вредности тежинског коефицијента, овакво померање зоне опасности је и очекивано и неки начин представља потврду валидности методе/модела.

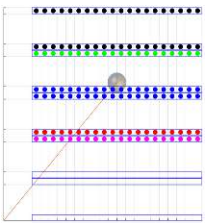
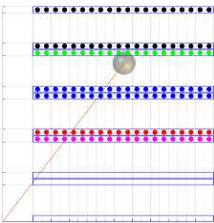

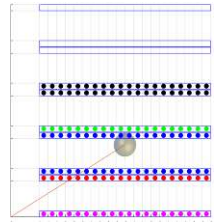

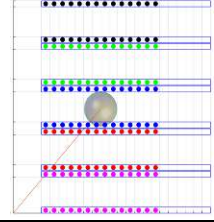
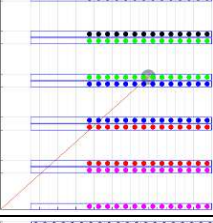
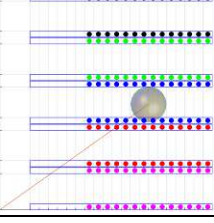
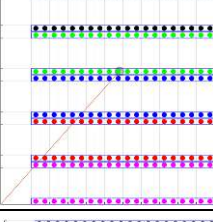
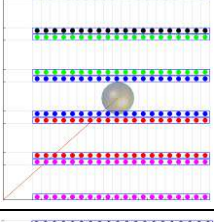

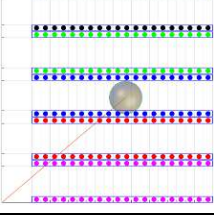
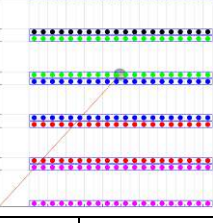
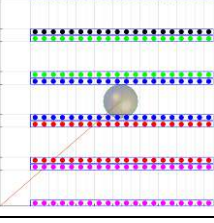


Слика 6.2 Графички приказ складишта за Layout 1 (гума у регалима 1 и 2)

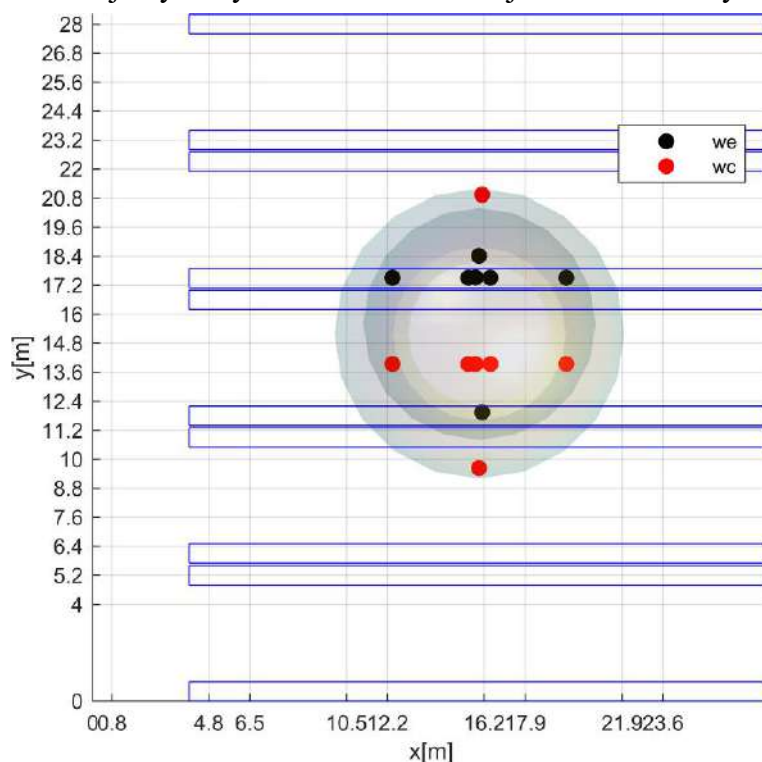
Као и у претходном примеру, на основу добијених локација потенцијалних зона опасности од пожара приказаних у Табели 6.10, формиране су две сфере (Слика 6.2). Оне у себи садрже претходно наведене позиције зона опасности ($X=11,7\text{ m}$; $Y=15,8\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4,8\text{ m}$ и $X=14,6\text{ m}$; $Y=15,8\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4,8\text{ m}$) и исте заједно представљају целокупни простор који обухвата и екстремне и насумичне варијанте расподеле материјала унутар посматраног високорегалног складишта. Запремина коју обухватају ове две сфере представља запремину коју треба узети у разматрање приликом пројектовања складишног система, система за гашење, превенцију и дојаву пожара, као и плана евакуације из складишта.

• **LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала врху)**

Табела 6.11 Параметри локација зона опасности од пожара за LAYOUT 2 (регали горе)

Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	
1.1	15,98	18,42	4,76	24,39	1,33		1.2	16,11	20,94	5,05	26,42	1,54		
2.1	16,11	11,95	5,05	20,05	0,75		2.2	15,98	9,64	4,76	18,67	1,58		
3.1	12,40	17,51	4,80	21,46	1		3.2	12,40	13,94	4,80	18,66	2,36		
4.1	19,60	17,51	4,80	26,28	1		4.2	19,60	13,94	4,80	24,05	2,36		
5.1	15,54	17,51	3,39	23,42	0,63		5.2	15,54	13,94	3,39	20,88	2,23		
6.1	16,45	17,51	6,21	24,03	0,63		6.2	16,46	13,94	6,21	21,57	2,23		
7.1	15,84	17,52	4,88	23,62	0,84		7.2	15,84	13,94	4,88	21,10	2,31		
● дрво			● картон			● иверица			● PVC пластика			● гума		

Услед промене оријентације регала из вертикалног положаја у хоризонтални, слично као и код Layout-а 1 (Табела 6.11) може се приметити да у случају тежинског коефицијента емисије штетних продуката сагоревања $w_{e5}=0.45105$, положај зоне опасности од пожара гравитира ка регалима који су испуњени складишним јединицама са гумом.



Слика 6.3 Графички приказ складишта за Layout 2 (гума у регалима 9 и 10)

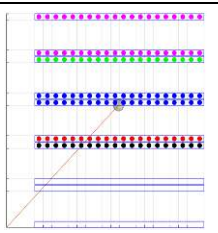
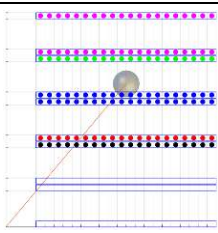
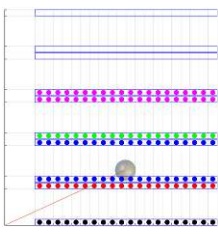
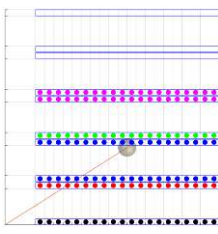
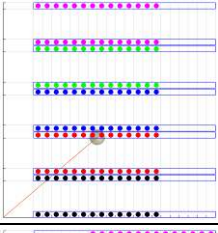
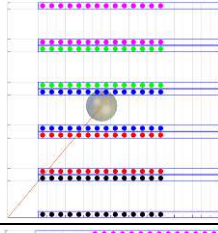
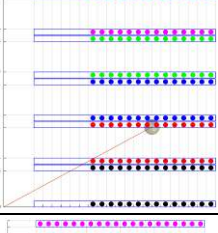
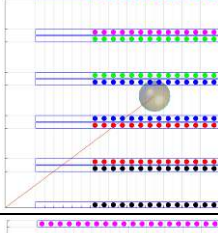
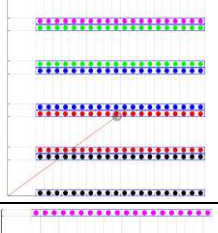
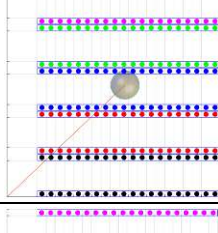
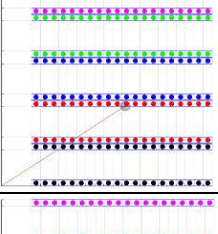
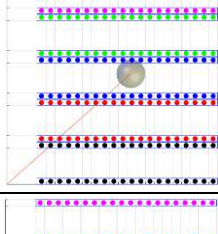
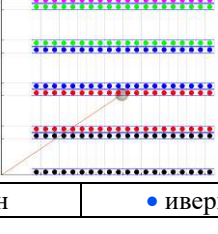
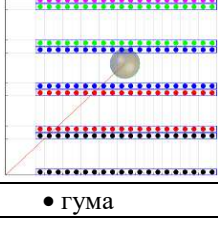
Увидом у резултате представљене у Табели 6.1, може се запазити да је позиција зоне опасности од пожара у случају када су складишне јединице насумично распоређене у регалима (варијанта 7.1 и 7.2) између зона опасности одређених у случајевима 1.1, 2.1,... итд, што се може објаснити на следећи начин:

- координата Y код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност Y координате код парова 1.1 и 2.1, односно 1.2 и 2.2, респективно;
- координата X код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност X координата код парова 3.1 и 4.1, односно 3.2 и 4.2;
- координата Z код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност Z координате код парова 5.1 и 6.1, односно 5.2 и 6.2.

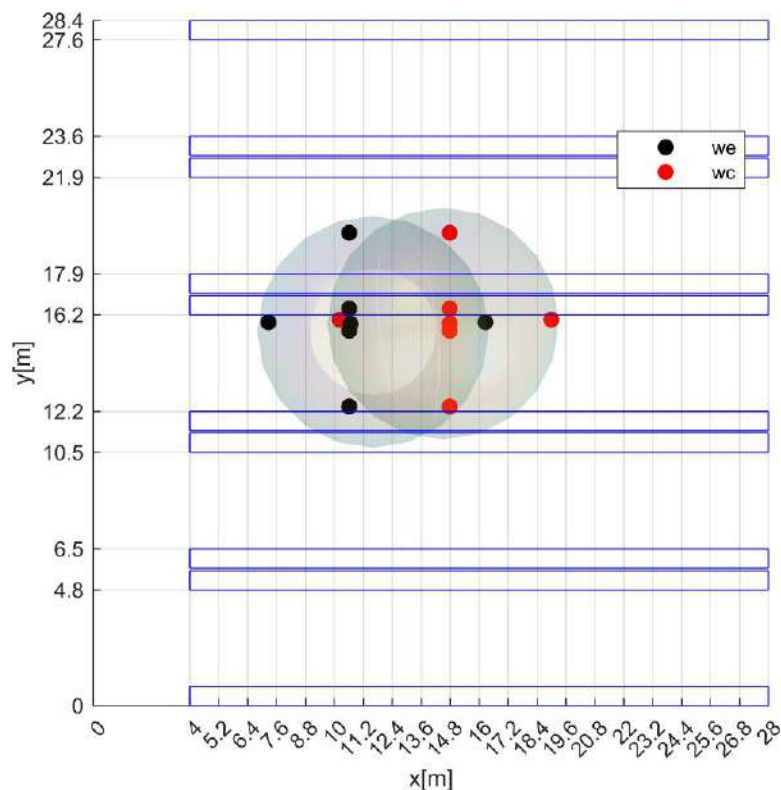
Користећи просторне координате потенцијалних зона опасности од пожара приказаних у Табели 6.11 генерисане су две сфере (видети Сliku 6.3), које у себи садрже претходно наведене просторне координате зона опасности ($X=16\text{ m}$; $Y=15,2\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=6\text{ m}$ и $X=16\text{ m}$; $Y=15,6\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4,8\text{ m}$). Због појаве преклапања, може се сматрати да је зона опасности од пожара заправо сфера која је дефинисана већим радијусом.

• **LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала на дну)**

Табела 6.12 Параметри локација зона опасности од пожара за LAYOUT 2 (регали доле)

Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	
1.1	15,89	16,26	4,56	22,74	0,83		1.2	16	18,99	4,82	24,83	1,78		
2.1	15,89	7,26	4,56	17,48	1,39		2.2	16	10,21	4,82	18,99	1,21		
3.1	12,4	10,61	4,8	16,32	1,04		3.2	12,4	14,78	4,8	19,29	2,08		
4.1	19,6	10,61	4,8	22,29	1,04		4.2	19,6	14,78	4,8	24,55	2,08		
5.1	15,54	10,61	3,39	18,82	0,69		5.2	15,54	14,78	3,39	21,44	1,93		
6.1	16,46	10,61	6,21	19,58	0,69		6.2	16,45	14,78	6,21	22,15	1,93		
7.1	15,84	10,67	4,88	19,08	0,87		7.2	15,84	14,77	4,88	21,66	2,02		
● дрво			● картон			● иверица			● PVC пластика			● гума		

У поређењу са претходним случајем, може се закључити да је зона опасности од пожара у случају када је симулација реализована коришћењем тежинских коефицијената везаних за емисију позиционирана ка доњем делу складишта тј. оријентисана је ка почетним регалима. Оваква појава се може објаснити чињеницом да гума као материјал има висок степен емисије гасова штетних по здравље људи и околину. Овакво померање зоне опасности је очекивано и представља потврду валидности методе/модела.

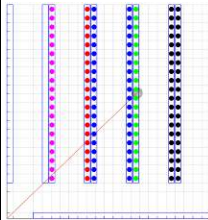

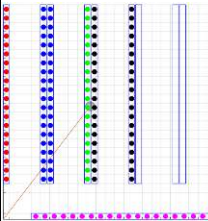
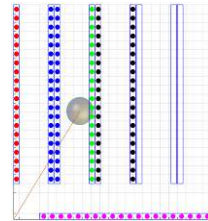
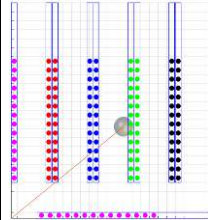
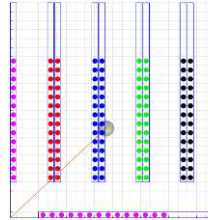
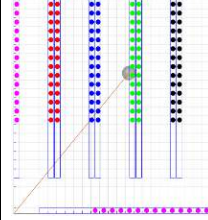
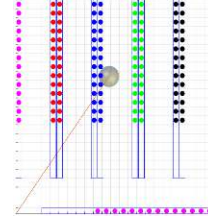
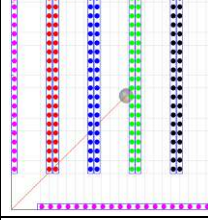
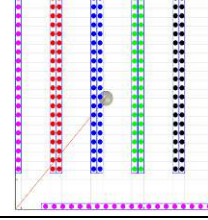
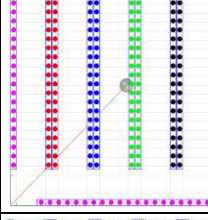
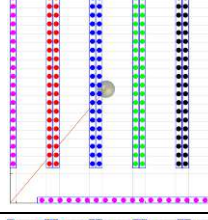
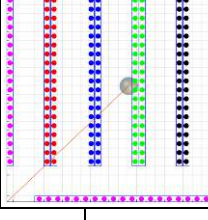
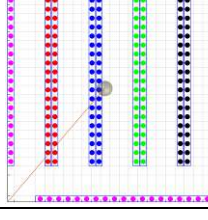


Слика 6.4 Графички приказ складишта за Layout 2 (гума у регалима 1 и 2)

На основу добијених просторних координата зона опасности од пожара, приказаних у Табели 6.10, формиране су две сфере (Слика 6.4). Сфере обухватају наведене позиције зона опасности ($X=11,6\text{ m}$; $Y=15,5\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4,8\text{ m}$ и $X=14,5\text{ m}$; $Y=15,8\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4,8\text{ m}$) и представљају целокупни простор који подразумева и екстремне и насумичне варијанте расподеле материјала унутар посматраног високорегалног складишта. Сфере заједно представљају целокупни простор који обухвата све случајеве распореда материјала у складишту за разматрани случај.

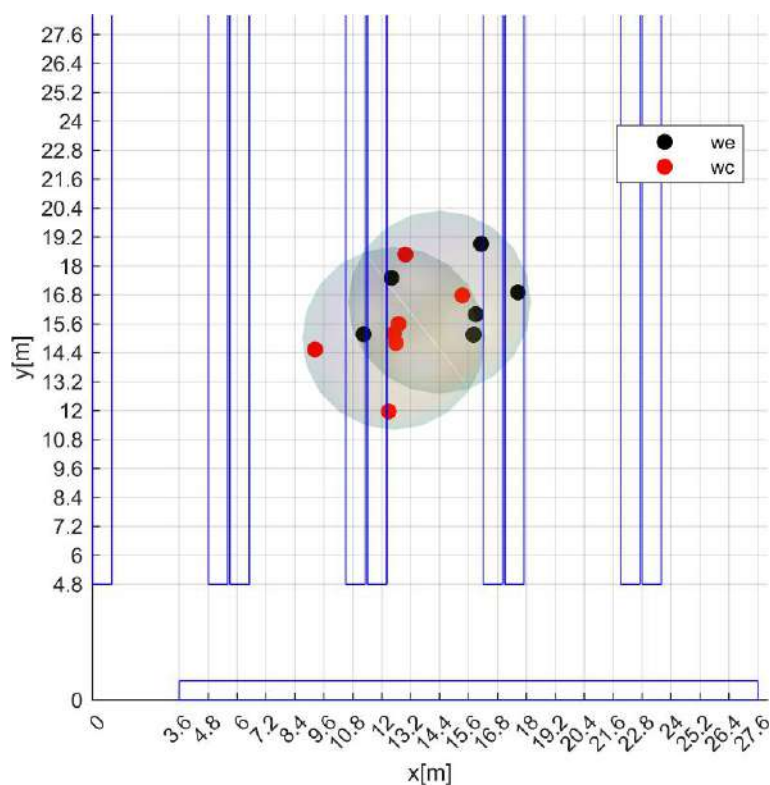
• **LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)**

Табела 6.13 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 3 (гума у регалима 9 и 10)

Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	
1.1	17,65	16,91	5,05	24,44	0,75		1.2	15,34	16,78	4,76	22,74	1,58		
2.1	11,24	15,17	5,05	18,88	0,67		2.2	9,23	14,54	4,76	17,22	1,89		
3.1	12,4	17,51	4,80	21,46	1		3.2	12,29	11,97	4,80	17,16	1,1		
4.1	16,12	18,92	4,80	24,86	0,98		4.2	12,98	18,48	4,80	22,58	1,43		
5.1	15,82	15,16	3,39	21,91	0,99		5.2	12,59	14,81	3,39	19,44	1,02		
6.1	15,9	16	6,21	22,56	0,95		6.2	12,7	15,6	6,21	20,13	1,21		
7.1	15,8	15,5	4,9	22,13	1,21		7.2	12,5	15,2	4,9	19,67	1,04		
● дрво			● картон			● иверица			● PVC пластика			● гума		

Анализом резултата представљених у Табели 6.13, може се закључити да су позиције зона опасности од пожара у случају када су складишне јединице насумично распоређене у регалима (варијанта 7.1 и 7.2) између зона опасности одређених у случајевима 1.1, 2.1,..., и друге, што се може објаснити на следећи начин:

- координата Y код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност Y координате код парова 1.1 и 2.1, односно 1.2 и 2.2, респективно;
- координата X код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност X координата код парова 3.1 и 4.1, односно 3.2 и 4.2;
- координата Z код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност Z координате код парова 5.1 и 6.1, односно 5.2 и 6.2.

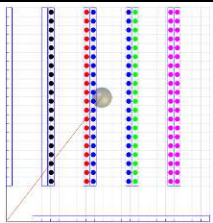
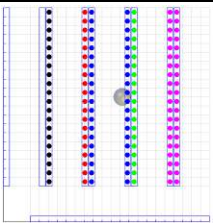
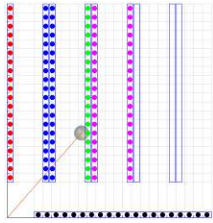
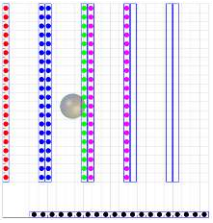
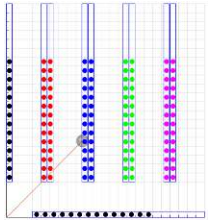
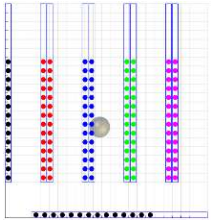
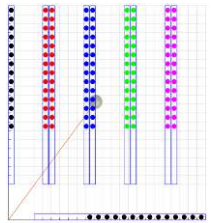
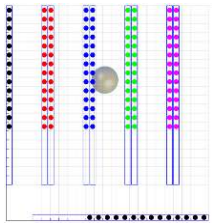
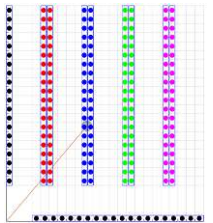
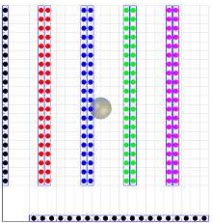
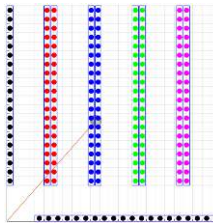
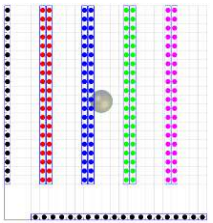
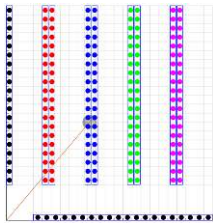
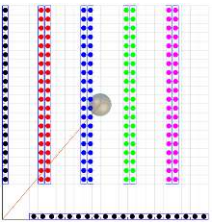


Слика 6.5 Графички приказ складишта за Layout 3 (гума у регалима 9 и 10)

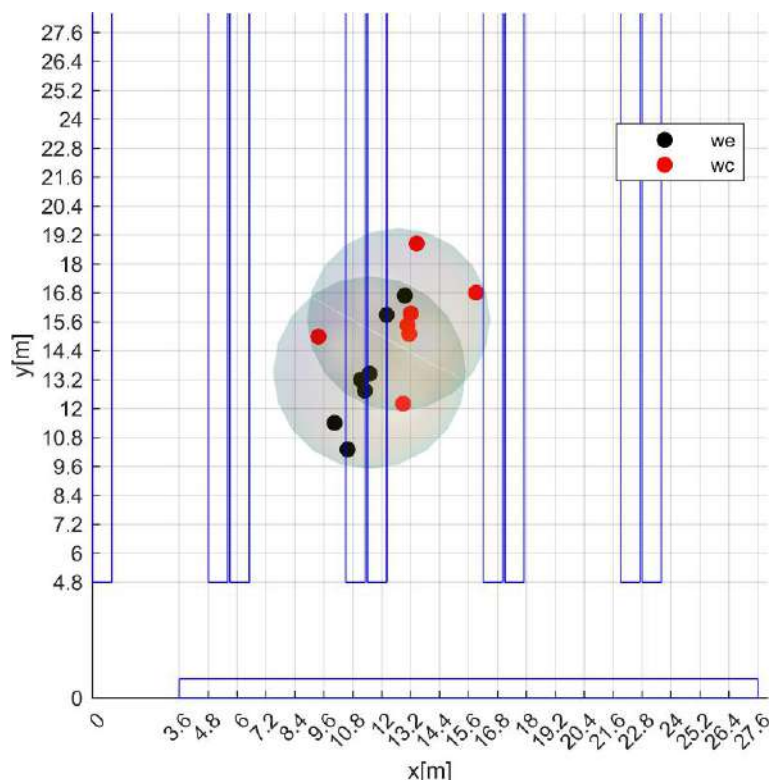
Користећи просторне координате потенцијалних зона опасности од пожара приказаних у Табели 6.13 креиране су две сферице (видети Сliku 6.5), које у себи садрже претходно наведене просторне координате зона опасности ($X=12,5\text{ m}$; $Y=15\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=3,8\text{ m}$ и $X=14,4\text{ m}$; $Y=16,5\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=3,8\text{ m}$). Исте заједно представљају целокупни простор који обухвата све случајеве распореда материјала у складишту за разматрани случај. На основу поменуте табеле и слике може се уочити померање координата сфера, што је у директној вези са распоредом регала у виду Layout-а 3.

• **LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.14 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 3 (гума у регалима 1 и 2)

Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	
1.1	12,96	16,69	4,56	21,14	1,38		1.2	15,91	16,81	4,82	23,14	1,20		
2.1	10,04	11,41	4,56	15,2	1,03		2.2	9,37	14,99	4,82	17,68	1,71		
3.1	10,58	10,31	4,8	14,77	0,87		3.2	12,89	12,21	4,8	17,76	1,41		
4.1	12,2	15,89	4,8	20,03	0,95		4.2	13,45	18,85	4,8	23,16	1,85		
5.1	11,29+	12,75	3,39	17,03	0,74		5.2	13,14	15,1	3,39	20,02	1,48		
6.1	11,49	13,45	6,21	17,69	0,76		6.2	13,21	15,95	6,21	20,71	1,56		
7.1	11,13	13,2	4,88	17,27	0,96		7.2	13,08	15,46	4,87	20,25	1,54		
● дрво			● картон			● иверица			● PVC пластика			● гума		

Анализом резултата симулације приказаних у Табели 6.12, може се закључити да је зона опасности од пожара у првом случају ближа улазу/излазу из складишта. Разлог за овакву позицију сфере се објашњава чињеницом да гума заузима први хоризонтални и први вертикални регал који су испуњени складишним јединицама са гумом, а чији тежински коефицијент има највећу вредност у поређењу са осталим.



Слика 6.6 Графички приказ складишта за Layout 3 (гума у регалима 1 и 2)

На основу просторних координата потенцијалних зона опасности од пожара (Табела 6.14), генерисане су две сфере (видети Сliku 6.6). Сфере у себи садрже претходно наведене просторне координате зона опасности ($X=11,5\text{ m}$; $Y=12,7\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4\text{ m}$ и $X=12,7\text{ m}$; $Y=15,7\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=3,8\text{ m}$). и обухватају целокупни простор за све случајеве распореда материјала у складишту за разматрани случај. Значајно одступање положаја сфере која представља целокупну зону опасности од појаве пожара у случају емисије штетних продуката у односу на сферу која представља укупну зону опасности од појаве пожара у случају сагоревања (видети Сliku 6.6) је последица специфичног распореда регала у складишту У поређењу са случајевима распореда у виду Layout-а 1 и 2. Овим се још једном потврђује ранија претпоставка да положај зоне опасности од појаве пожара у случају тежинских коефицијената везаних за емисију штетних продуката гравитира ка регалима који су испуњени складишним јединицама са гумом. Због повећане емисије штетних продуката, гума има значајан негативни утицај на здравље људи у односу на лако запаљиве материјале као што су нпр. картон или дрво.

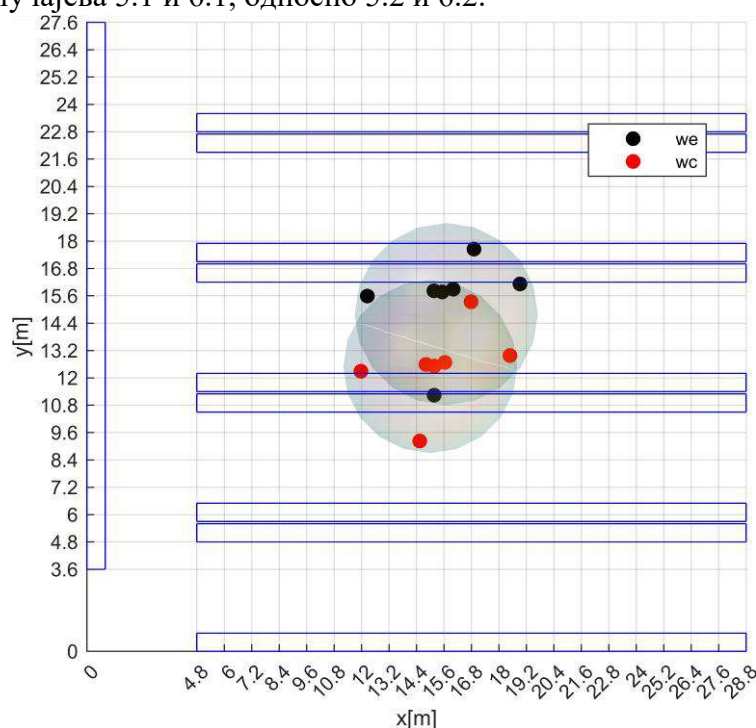
• **LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)**

Табела 6.15 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 4 (гума у регалима 9 и 10)

Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	
1.1	16,91	17,65	5,05	24,44	0,75		1.2	16,78	15,34	4,76	22,74	1,58		
2.1	15,17	11,24	5,05	18,88	0,67		2.2	14,54	9,23	4,76	17,22	1,89		
3.1	12,25	15,59	4,8	19,83	1,33		3.2	11,97	12,29	4,8	17,16	1,09		
4.1	18,92	16,12	4,8	24,86	0,98		4.2	18,48	12,98	4,8	22,58	1,43		
5.1	15,16	15,82	3,39	21,91	0,99		5.2	14,81	12,59	3,39	19,44	1,02		
6.1	16	15,89	6,21	22,56	0,95		6.2	15,64	12,68	6,21	20,13	1,21		
7.1	15,52	15,77	4,88	22,13	1,21		7.2	15,18	12,52	4,88	19,68	1,04		
● дрво			● картон			● иверица			● PVC пластика			● гума		

Као у претходним случајевима распореда регала и складишних јединица, на основу резултата приказаних у Табели 6.15, може се приметити да у случају када су складишне јединице са материјалима насумично распоређене у регалима (тј. варијанте 7.1 и 7.2) позиције зона опасности од пожара су између зона опасности добијених симулацијом у случајевима од 1.1, 2.1,..., итд. Ово се може објаснити на следећи начин:

- координата Y код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност Y координате код случајева 1.1 и 2.1, односно 1.2 и 2.2, респективно;
- координата X код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност X координате код случајева 3.1 и 4.1, односно 3.2 и 4.2;
- координата Z код варијанте 7.1 и 7.2, представља приближно средњу вредност Z координате код случајева 5.1 и 6.1, односно 5.2 и 6.2.

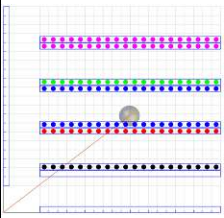
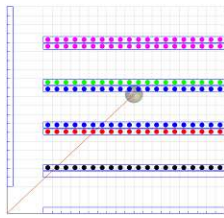
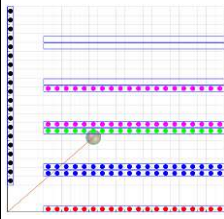
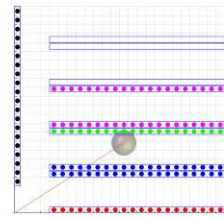
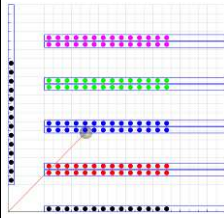
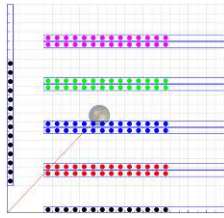
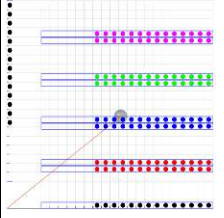
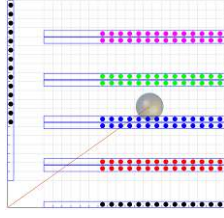
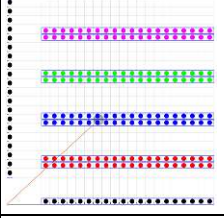
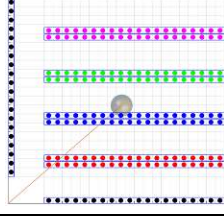
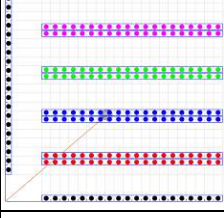
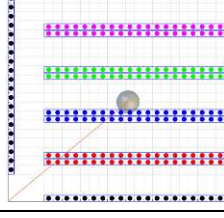
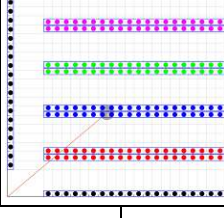
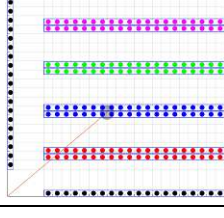


Слика 6.7 Графички приказ складишта за Layout 4 (гума у регалима 9 и 10)

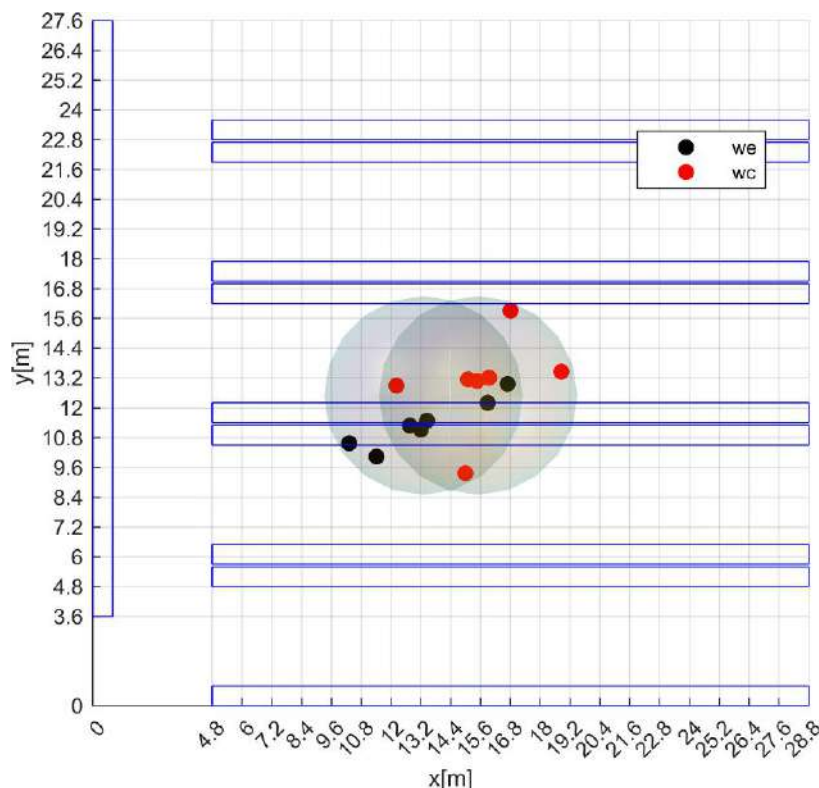
На основу просторних координата потенцијалних зона опасности од пожара (Табела 6.15), формиране су две сферице приказане на Сlici 6.7, које обухватају претходно наведене просторне координате зона опасности ($X=15,7\text{ m}$; $Y=14,8\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4,8\text{ m}$ и $X=15\text{ m}$; $Y=12,5\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4,8\text{ m}$). Као и у случају распореда регала у складишту у виду Layout-а 3 (видети Сliku 6.5), дошло је до значајне разлике у положајним сфера које представљају зону опасности од појаве пожара у случају тежинских коефицијената w_{ei} и w_{ci} . Наведено одступање између положаја сфера је последица распореда у складишту где већина регала (9 од 10), уместо вертикалне има хоризонталну оријентацију.

• **LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.16 Параметри локација зона опасности од пожара за Layout 4 (гума у регалима 1 и 2)

Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	Случај	X	Y	Z	r	R	Поглед	
1.1	16,69	12,96	4,56	21,14	1,38		1.2	16,81	15,91	4,82	23,14	1,2		
2.1	11,41	10,04	4,56	15,2	1,03		2.2	14,99	9,37	4,82	17,68	1,71		
3.1	10,31	10,58	4,8	14,77	0,87		3.2	12,21	12,89	4,8	17,76	1,41		
4.1	15,89	12,2	4,8	20,03	0,95		4.2	18,85	13,45	4,8	23,16	1,85		
5.1	12,75	11,29	3,39	17,03	0,74		5.2	15,1	13,14	3,39	20,02	1,48		
6.1	13,45	11,49	6,21	17,69	0,76		6.2	15,95	13,21	6,21	20,71	1,56		
7.1	13,2	11,13	4,88	17,27	0,96		7.2	15,46	13,08	4,87	20,25	1,54		
● дрво			● картон			● иверица			● PVC пластика			● гума		

Поређењем резултата симулације (Табела 6.16), може се закључити да је зона опасности од пожара у првом случају ближа улазу/излазу из складишта. Разлог за овакву позицију сфере се објашњава чињеницом да гума заузима први хоризонтални и први вертикални регал који су испуњени складишним јединицама са гумом, а чији тежински коефицијент има највећу вредност у поређењу са осталим.



Слика 6.8 Графички приказ складишта за Layout 4 (гума у регалима 1 и 2)

На основу просторних координата потенцијалних зона опасности од пожара из Табеле 6.12, генерисане су две сфере (видети Сliku 6.6), које у себи садрже претходно наведене просторне координате зона опасности ($X=13,3\text{ m}$; $Y=12,5\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4\text{ m}$ и $X=15,5\text{ m}$; $Y=13\text{ m}$; $Z=4,8\text{ m}$; $R=4,2\text{ m}$). Исте обухватају целокупни простор за све случајеве распореда материјала у складишту за разматрани случај.

6.3 Варијанта 3 - укупна испуњеност складишта 70%

У оквиру ове варијанте од расположивих 20 случајева распореда складишних јединица у регалима насумично је одабрана једна комбинација понуђених случајева (1-3-5-7-10-12-13-15-18-20), која ће бити примењена на сва четири layout-а. Као и код претходних варијанти, примењен је иницијални распоред где складишне јединице са дрветом заузимају прва два регала, док су складишне јединице са гумом заступљене код крајњих регала и обратно.

- **LAYOUT 1** (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)

Табела 6.17 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{cis} за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 1 - 70%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
17,5	16,6	4,83	24,63	0,77	13,9	16,9	4,81	22,39	2,27

● дрво
 ● картон
 ● иверица
 ● PVC пластика
 ● гума

Поређењем резултата приказаних у Табелама 6.1 и 6.17, а у вези са коефицијентом емисије штетних гасова w_{ei} (лева колона) и коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} (десна колона), могу се извести следећи закључци:

- Код прорачуна положаја потенцијалне зоне опасности у оба случаја није дошло до значајних промена вредности координата X , Y и Z , као и радијуса сфере r .
- Као и у претходном случају, сфера која представља зону опасности од пожара је у случају емисије у подручју регала са PVC пластиком и иверицом, док је у случају коефицијената везаних за сагоревање сфера скоро симетрично позиционирана између регала са иверицом.

• **LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.18 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 1 - 70%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
10,6	17,2	5,04	20,79	0,84	14,8	16,9	4,81	22,98	2,01

• дрво
• картон
• иверица
• PVC пластика
• гума

Анализирајући резултате симулације који су представљени у Табели 6.18 и Табели 6.2 када регали попуњени складишним јединицама са гумом заузимају прва два места у складишту, може се уочити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности од пожара врши коришћењем коефицијената емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до промене координата по Y и Z оси и смањења радијуса сфере r .
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} није дошло до значајнијих промена координата по све три осе.
- Сфера која представља потенцијалну зону опасности од пожара, као у варијанти распореда приказаног у Табели 6.2, у случају примене коефицијената везаних за сагоревање, налази се у близини средишне линије коридора
- Сфера која представља зону опасности од пожара је у случају емисије и близини регала са картоном, док се у случају сагоревања сфера налази између регала са иверицом.

• **LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају горња два регала)**

Табела 6.19 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 2 - 70%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
16,6	17,5	4,8	24,59	0,76	16,9	13,9	4,81	22,45	2,31

• дрво • картон • иверица • PVC пластика • гума

На основу резултата добијених коришћењем методе, а приказаних у Табелама 6.19 и 6.3, може се приметити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности од појаве пожара врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , није дошло до значајних промена просторних координата по осама X , Y и Z .
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} дошло је до промене координата по осама X и Y , а такође и смањења радијуса сфере, што је последица насумичног избора начина попуњавања регала складишним јединицама.
- Због доминантног утицаја тежинског коефицијента везаног за гуму у првом случају, као и у претходним, зона опасности од пожара гравитира ка регалима који су попуњени складишним јединицама које садрже гуму.
- Сфера која представља зону опасности од појаве пожара је у случају емисије у близини регала са PVC пластиком и иверицом, а у случају сагоревања центар сфере је скоро на средишњој линији коридора и заузима позицију између регала са иверицом.

• **LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају доња два регала)**

Табела 6.20 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 2 - 70%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
17,2	10,6	5,03	20,82	0,87	16,8	14,8	4,77	22,90	1,99

• дрво	• картон	• иверица	• PVC пластика	• гума
--------	----------	-----------	----------------	--------

Анализом резултата добијених симулацијом, а који су представљени у Табелама 6.20 и 6.4, може се констатовати следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности од пожара врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара тј. дошло је до извесних промена координата X и Z .
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} дошло је до мање промене координате по оси X .
- У првом случају, због доминантног утицаја тежинског коефицијента везаног за гуму, зона опасности од пожара усмерена је ка регалима који су попуњени складишним јединицама које садрже гуму.
- Сфера која представља зону опасности од пожара је у случају емисије у близини је регала са картоном, а у случају сагоревања налази се између регала који су испуњени иверицом.

• **LAYOUT 3** (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)

Табела 6.21 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 3 - 70%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
15,9	16,2	4,84	23,19	1,04	12,68	16	4,81	20,99	1,20

На основу Табеле 6.5 и Табеле 6.21 у којима су садржани резултати симулације у виду просторних координата потенцијалних зона опасности од појаве пожара, може се закључити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности од пожара врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до мање промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара у виду промене координате X .
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} није дошло значајнијих промена по питању положаја потенцијалне зоне опасности од пожара.
- У првом случају због доминантног утицаја тежинског коефицијента везаног за гуму, зона опасности од пожара је ближа регалима који су попуњени складишним јединицама које садрже гуму.
- Сфера која представља зону опасности од појаве пожара је у случају емисије близу регала са PVC пластиком, док у случају сагоревања, сфера заузима позицију између регала који су испуњени иверицом.

• **LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.22 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 3 - 70%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
11,5	14,2	5,05	18,95	0,74	13,2	16,3	4,82	21,53	1,62

• дрво • картон • иверица • PVC пластика • гума

На основу Табеле 6.22 и Табеле 6.6 у којима су садржани резултати симулације у виду просторних координата потенцијалних зона опасности од појаве пожара, може се закључити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности од појаве пожара врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара у виду промене координате Y . Такође, дошло је и до промене вредности радијуса сфере r .
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} такође је дошло до промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара у виду промене координате Y .
- Сфера која представља зону опасности од пожара у случају примене коефицијената емисије заузима положај близак регалима са иверицом, док у случају примене коефицијената везаних за сагоревање, сфера сада заузима позицију између регала исушеног складишних јединицама са PVC пластиком и регала који су испуњени иверицом.

• **LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)**

Табела 6.23 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 4 - 70%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
16,2	15,9	4,83	23,19	1,05	16	12,7	4,81	20,99	1,19

• дрво • картон • иверица • PVC пластика • гума

Поређењем резултата симулације приказаних у Табели 6.23 и Табели 6.7, а који представљају просторне координате потенцијалних зона опасности од појаве пожара, може се закључити:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности од појаве пожара врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до мање промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара у виду промене координате X . Такође, дошло је и до смањења радијуса сфере r .
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} , такође је дошло до промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара у виду промене координате X .
- Сфера која представља зону опасности од пожара у случају коефицијената емисије заузима положај близак регалима са PVC пластиком, док у случају коефицијената везаних за сагоревање, сфера заузима позицију блиску регалима са иверицом.

• **LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.24 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 4 - 70%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
14,2	11,5	5,05	18,95	0,74	16,3	13,2	4,81	21,54	1,62

Анализирајући резултате симулације који су представљени у Табели 6.24 и Табели 6.8 када регали попуњени складишним јединицама са гумом заузимају прва два места у складишту, може се уочити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности од пожара врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара у виду промене координата X и Z . Такође, дошло је и до смањења радијуса сфере r .
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} , дошло је до промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара у виду промене координате X .
- У случају примене коефицијената емисије, сфера која представља зону опасности од пожара заузима положај унутар регала са иверицом. У случају примене коефицијената везаних за сагоревање, сфера се налази у близини регала са иверицом.

6.4 Варијанта 4 - укупна испуњеност складишта 50%

У оквиру ове варијанте, од 20 расположивих случајева распореда складишних јединица у регалима, насумично је одабрана једна комбинација понуђених случајева (2-4-6-8-9-11-14-16-17-19), која ће бити примењена на сва четири layout-а. Као и код претходних варијанти, примењен је иницијални распоред где складишне јединице са дрветом заузимају прва два регала, док су складишне јединице са гумом заступљене код крајњих регала и обратно.

- **LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)**

Табела 6.25 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 1 - 50%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
17,5	15	4,91	23,59	0,78	13,9	14,5	4,81	20,65	2,29

● дрво
● картон
● иверица
● PVC пластика
● гума

Поређењем резултата приказаних у Табелама 6.25, 6.17 и 6.1, а у вези са коефицијентом емисије штетних гасова w_{ei} (лева колона) и коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} , (десна колона), могу се извести следећи закључци:

- По питању локације потенцијалне зоне опасности од пожара, дошло је до промене вредности координате Y и радијуса сфере r као у случају испуњености од 70%.
- Код оба случаја, положај сфера у складишту је непромењен у односу на претходне две варијанте испуњености складишта.

• **LAYOUT 1 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.26 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 1 - 50%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
10,6	14,1	4,42	18,21	0,52	14,8	14,6	4,87	21,31	1,99

• дрво • картон • иверица • PVC пластика • гума

Анализирајући резултате симулације који су представљени у Табели 6.26, Табели 6.18 и Табели 6.2 када регали попуњени складишним јединицама са гумом заузимају прва два места у складишту, може се уочити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности врши употребом коефицијената емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до промене кордината по Y и Z оси и значајног смањења радијуса сфере r у односу на варијанте испуњености складишта од 50% и 70%.
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинских коефицијената у вези са сагоревањем w_{ci} , дошло је до промене координате Y у обе варијанте испуњености складишта.
- У случају примене коефицијената везаних за емисију, сфера која представља зону опасности од пожара гравитира ка регалима који су испуњени складишним јединицама са гумом и налази се у близини регала са картоном. У случају примене коефицијената везаних за сагоревање сфера се налази између регала испуњених складишним јединицама са иверицом.

• **LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)**

Табела 6.27 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 2 - 50%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
15	17,5	4,90	23,59	0,78	14,5	13,9	4,81	20,65	2,29

• дрво • картон • иверица • PVC пластика • гума

На основу резултата добијених коришћењем развијене методе, а који су приказани у табелама 6.27, 6.19 и 6.3, може се приметити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , вредност координате по оси X се променила, док је вредност радијуса сфере остала непромењена.
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} , такође се може приметити промена вредности координате по оси X . Вредност радијуса сфере је остала непромењена.
- Због доминантног тежинског коефицијента везаног за гуму, у првом случају, као и у претходним, зона опасности од пожара гравитира ка регалима који су попуњени складишним јединицама које садрже гуму.
- У случају примене коефицијената везаних за емисију, сфера која представља зону опасности од пожара заузима положај близак регалима са PVC пластиком и иверицом. У случају примене коефицијената везаних за сагоревање, центар сфере је скоро на средишњој линији коридора и сфера се налази између регала са иверицом.

• **LAYOUT 2 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.28 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 2 - 50%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
14,1	10,6	4,42	18,21	0,52	14,6	14,8	4,87	21,31	1,99

• дрво
 • картон
 • иверица
 • PVC пластика
 • гума

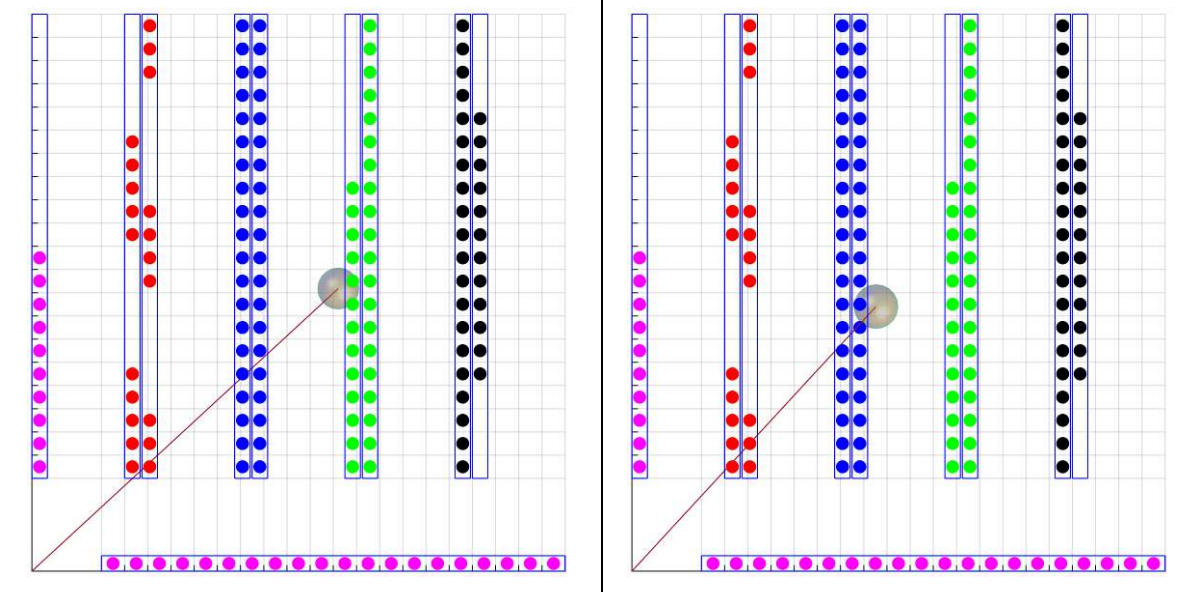
Анализом резултата добијених симулацијом, а који су представљени у Табелама 6.28, 6.20 и 6.4, може се констатовати следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , вредности координата по осама X и Z су промењене, као и вредност радијуса сфере r у односу на претходне две варијанте испуњености складишта.
- У другом случају, када су прорачун и симулација реализовани на основу тежинских коефицијената у вези са сагоревањем w_{ci} , може се приметити промена вредности координате по оси X . Вредност радијуса сфере је остала непромењена.
- Сфера која представља зону опасности од пожара је у случају емисије близу регала са картоном, а у случају сагоревања налази се између регала који су испуњени иверицом.

• **LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)**

Табела 6.29 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 3 - 50%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
15,9	14,6	4,91	22,12	1,08	12,6	13,7	4,81	19,24	1,15



• дрво
 • картон
 • иверица
 • PVC пластика
 • гума

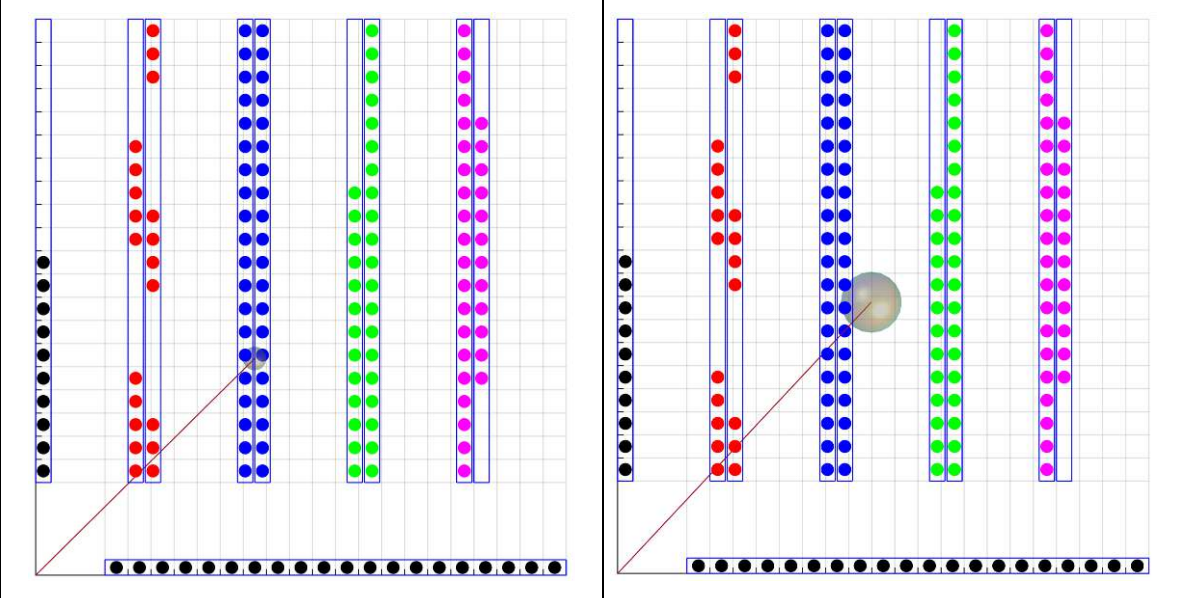
На основу Табела 6.29, 6.21 и 6.5 у којима су садржани резултати симулације у виду просторних координата положаја потенцијалних зона опасности од појаве пожара, може се закључити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до мање промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара због промене вредности координате Y у односу на варијанте код којих је испуњеност складишта 50 и 70%.
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} , положај потенцијалне зоне опасности од пожара је промењен због промене вредности координате по оси Y .
- Сфера која представља зону опасности од пожара је у случају емисије близу регала са PVC пластиком, док у случају сагоревања, сфера заузима позицију у близини регала који су испуњени складишним јединицама са иверицом.

• **LAYOUT 3 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.30 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} , за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 3 - 50%)

X_1	Y_1	Z_1	r_1	R_1	X_2	Y_2	Z_2	r_2	R_2
11,4	11,2	4,42	16,59	0,61	13,2	14,1	4,87	19,89	1,58



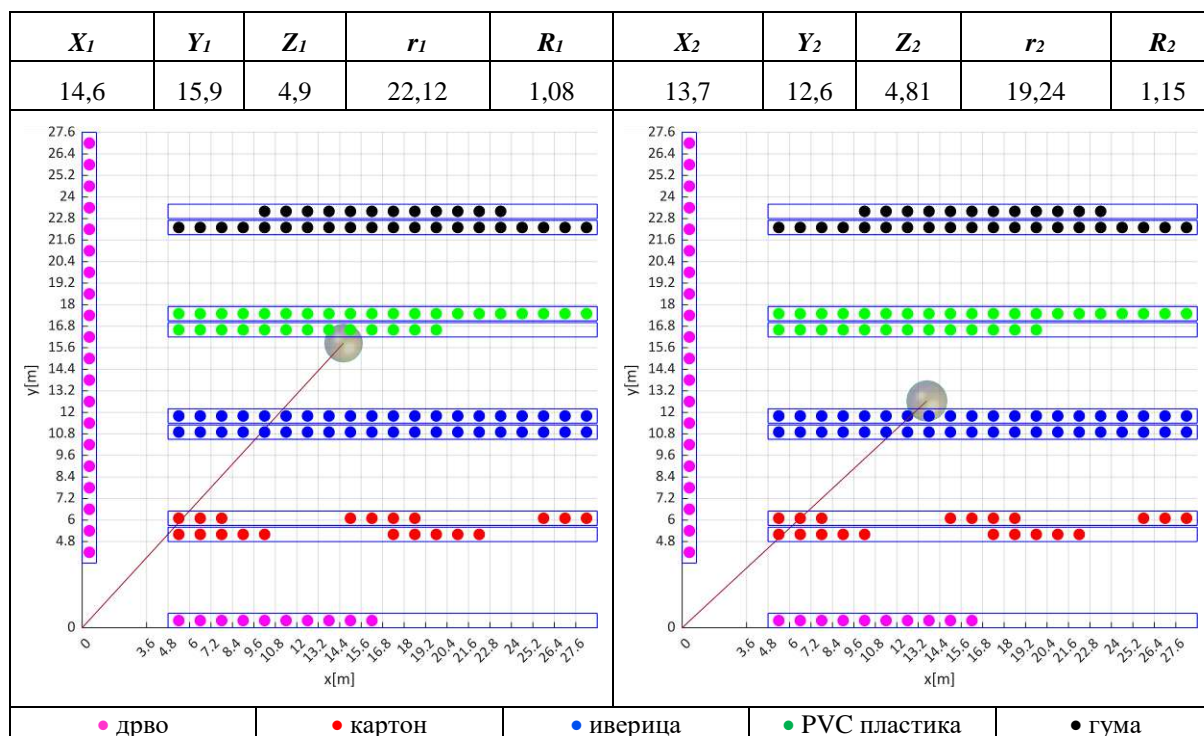
• дрво
• картон
• иверица
• PVC пластика
• гума

Анализирајући резултате симулације који су представљени у Табели 6.30, Табели 6.22 и Табели 6.6, када регали попуњени складишним јединицама са гумом заузимају прва два места у складишту, може се уочити следеће:

- Код првог случаја, када се прорачун потенцијалних зона опасности врши применом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до промене координата по Y и Z оси и смањења радијуса сфере r у односу на варијанте испуњености складишта од 50% и 70%.
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} , дошло је до промене координате Y у односу на обе варијанте испуњености складишта. Радијус сфере r је непромењен.
- У случају примене коефицијената везаних за емисију, сфера која представља зону опасности од пожара гравитира ка регалима који су испуњени складишним јединицама са гумом и налази се између регала са иверицом. У случају примене коефицијената везаних за сагоревање, сфера се налази у близини регала са иверицом.

• **LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају последња два регала)**

Табела 6.31 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{ci} за случај када складишне јединице са гумом заузимају последња два регала (Layout 4 - 50%)

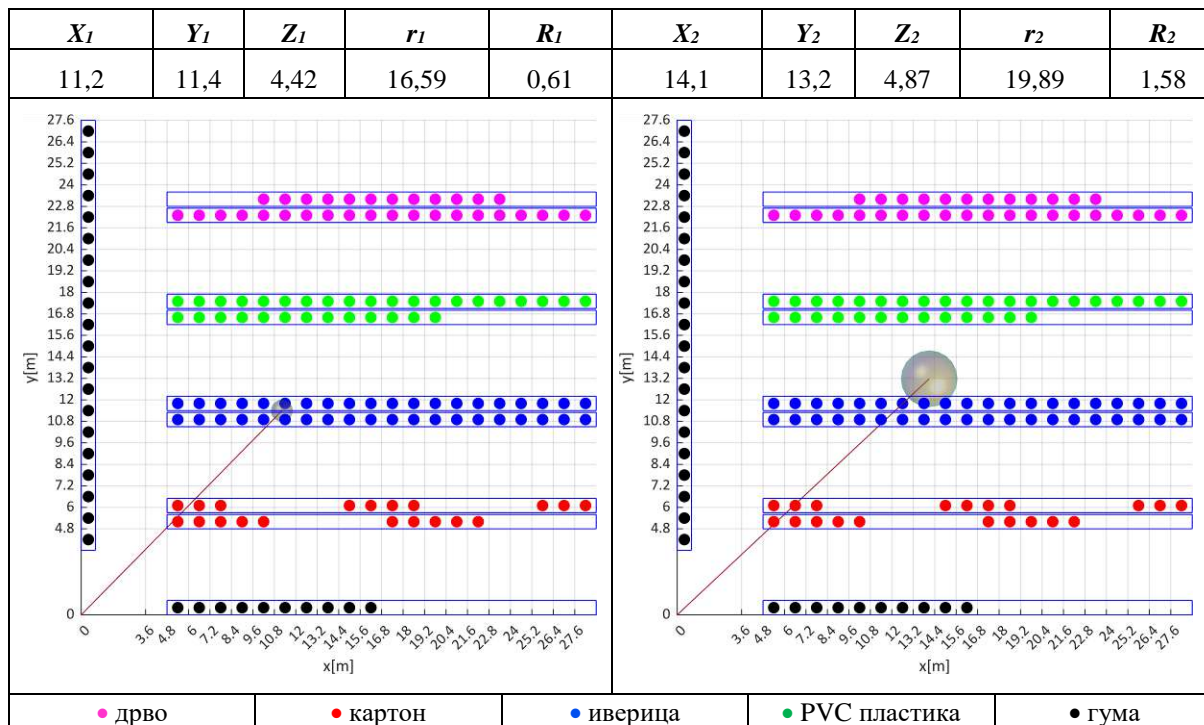


На основу Табела 6.31, 6.23 и 6.7 у којима су садржани резултати симулације у виду просторних координата потенцијалних зона опасности од појаве пожара, може се закључити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , дошло је до мање промене положаја потенцијалне зоне опасности од пожара због промене вредности координате X у односу на варијанте у којима је испуњеност складишта 50 и 70%. Такође је дошло до смањења радијуса сфере r .
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} , положај потенцијалне зоне опасности од пожара је такође промењен услед промене вредности координате по оси X .
- У случају примене коефицијената везаних за емисију, сфера која представља зону опасности од пожара гравитира ка регалима који су испуњени складишним јединицама са гумом и налази се у близини регала са PVC пластиком. У случају примене коефицијената везаних за сагоревање, сфера се налази у близини регала са иверицом.

• **LAYOUT 4 (складишне јединице са гумом заузимају прва два регала)**

Табела 6.32 Параметри локација зона опасности од пожара применом коефицијената w_{ei} и w_{cis} за случај када складишне јединице са гумом заузимају прва два регала (Layout 4 - 50%)



На основу резултата добијених коришћењем развијене методе, а који су приказани у Табелама 6.32, 6.24 и 6.8, може се закључити следеће:

- У првом случају, када се прорачун потенцијалних зона опасности врши употребом коефицијента емисије штетних гасова w_{ei} , вредности координата по оси X и Y су промењене, а такође и вредност радијуса сфере r .
- У другом случају, када је прорачун спроведен коришћењем тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} , такође се може приметити промена вредности координате по оси X .
- Због доминантног тежинског коефицијента везаног за гуму, у првом случају, као и у претходним, зона опасности од пожара гравитира ка регалима који су попуњени складишним јединицама које садрже гуму.
- У случају примене коефицијената везаних за емисију штетних материја, сфера која представља зону опасности од пожара је у близини регала са иверицом. У случају коефицијената везаних за сагоревање, центар сфере је скоро на средишњој линији коридора и сфера се налази у коридору између регала са иверицом и PVC пластиком.

6.5 Резултати добијени применом оптимизационих алгоритама

У претходном поглављу наглашено је да у циљу побољшања мера противпожарне заштите у складишту, са аспекта безбедности људства и самог објекта, потребно је извршити одабир погодне конфигурације складишта са одговарајућим распоредом регала (layout), одговарајућом процентуалном испуњеношћу регала складишним јединицама и распоредом материјала по складишним јединицама. У циљу добијања поменуте конфигурације складишта, примењена су два оптимизациона алгоритама: алгоритам диференцијалне еволуције (DE) и алгоритам претраге и спасавања (SARO). Резултати добијени поступком оптимизације показују, на конкретном примеру, који распоред регала у складишту се може сматрати оптималним приликом планирања конфигурације складишта и припадајућих безбедносних мера.

Кључни параметри за спровођење поступка оптимизације су:

- укупан број различитих распореда регала у складишту (layout-a) - 4,
- укупан број регала у складишту - 10,
- укупан број различитих материјала - 5 тј, сваки материјал заузима 2 регала,
- укупан број различитих распореда регала у складишту, према врстама материјала - 113400,
- број различитих начина слагања складишних јединица у регале - 20.

У циљу добијања што прецизнијих резултата у поступку оптимизације, уведена су два ограничења:

- Ограничење 1 - уводи се у циљу спречавања појаве истих случајева распореда складишних јединица, број регала који су попуњени на исти начин је 2 (од 20),
- Ограничење 2 - уводи се како би се убрзао процес претраге за најбољим решењем у поступку оптимизације, њиме се сужава простор претраге само на регале.

За оба оптимизациона алгоритама је подешено да број итерација износи 1000, док је величина популације 30.

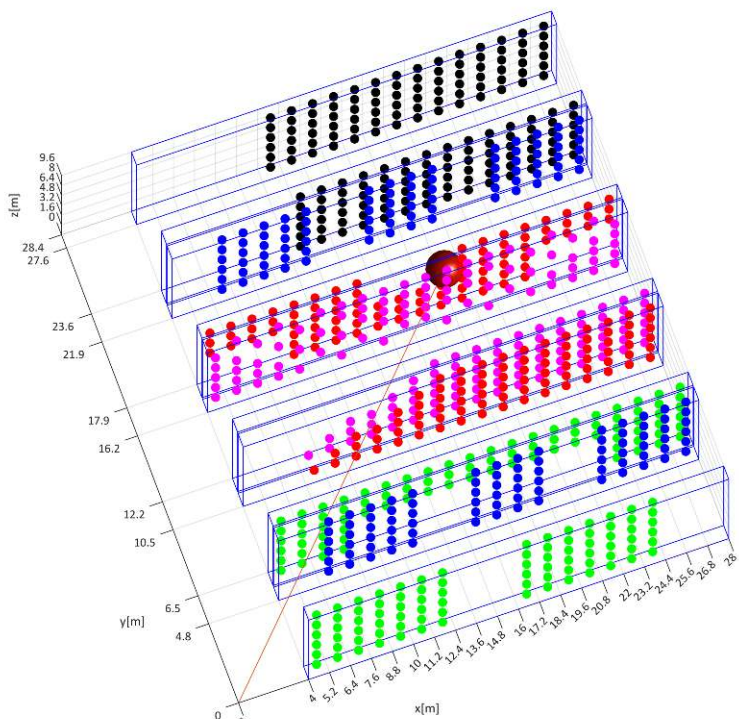
Процес оптимизације је реализован коришћењем кода у виду MATLAB скрипти, DE алгоритма [103] и SARO алгоритма добијеног од аутора [88,95].

6.5.1 DE алгоритам

• Испуњеност складишта 70% (тежински коефицијент w_{ei})

Табела 6.33 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ei} и испуњеност складишта од 70% (DE)

X	Y	Z	r	R	Layout	Пермутација - 81451										Случајеви распореда
18,19	18,04	4,82	26,07	1,03	2	4	3	4	2	1	1	2	3	5	5	6-7-9-13-13-16-12-7-3-3



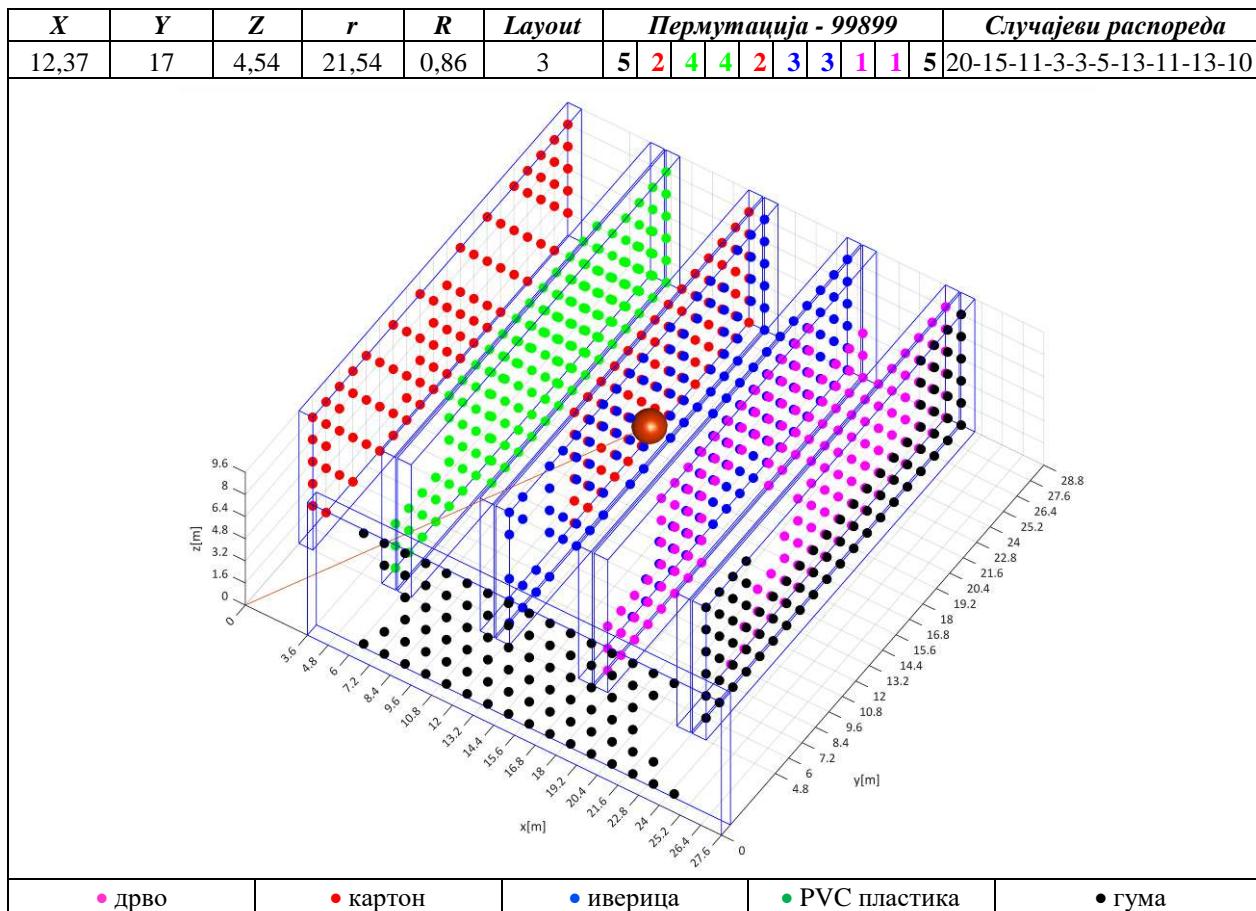
● дрво	● картон	● иверица	● PVC пластика	● гума
--------	----------	-----------	----------------	--------

На основу резултата оптимизације приказаних у Табели 6.33, може се закључити следеће:

- Оптимални распоред регала у складишту је под редним бројем 2,
- Распоред материјала по регалима је: PVC – иверица – PVC – картон – дрво – картон – иверица – гума - гума, а редни број пермутације која представља распоред регала у складишту - 81451/113400,
- Регали са гумом заузимају последње две позиције у складишту, што потврђује ранију претпоставку да складишне јединице са гумом морају испуњавати крајње регале, због доминантног утицаја тежинског коефицијента w_{e5} за гуму. Оптимални распоред регала на основу начина испуне регала је 6-7-9-13-13-16-12-7-3-3
- У поређењу са резултатима приказаним у Табели 6.19, где складишне јединице са гумом испуњавају крајње регале и где је попуњавање регала у оквиру Layout-а 2 вршено насумично, може се запазити да је у овом примеру дошло до повећања растојања сфере од почетног положаја, што је и дефинисано у оквиру функције циља. У овом случају сфера се налази у непосредној близини регала са картоном.

• Испуњеност складишта 70% (тежински коефицијент w_{ci})

Табела 6.34 Изглед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ci} и испуњеност складишта од 70% (DE)



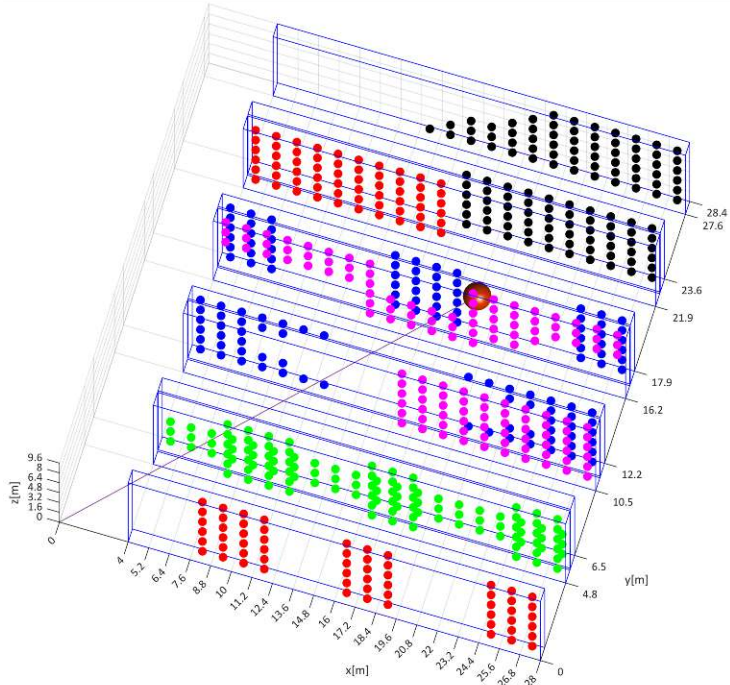
Анализом резултата оптимизације приказаних у Табели 6.34, може се закључити следеће:

- Оптимални распоред регала у складишту представљен је у виду layout-а 3,
- Распоред материјала по регалима је: гума – картон – PVC – PVC – картон – иверица – иверица – дрво – дрво – гума, док је редни број пермутације која представља распоред регала у складишту - 99899/113400,
- Регали са гумом заузимају почетну и крајњу позицију у складишту. Из тог разлога овакав распоред регала није могуће у потпуности поредити са распоредима регала приказаним у Табелама 6.21 и 6.22. Уочљиво је да у овом примеру сфера заузима најдаљу позицију тј. координата Y има највећу вредност, што јесте циљ са аспекта безбедности и евакуације. Такође се може приметити да је радијус сфере у овом примеру најмањи и најближи регалима.
- Оптимални распоред регала на основу начина испуне регала је 20-15-11-3-3-5-13-11-13-10, док је сфера на позицији блиској регалу са иверицом.

• Испуњеност складишта 50% (тежински коефицијент w_{ei})

Табела 6.35 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ei} и испуњеност складишта од 50% (DE)

X	Y	Z	r	R	Layout	Пермутација - 38494	Случајеви распореда
18,82	17,97	4,61	26,43	0,79	2	2 4 4 1 3 1 3 2 5 5	7-7-2-3-18-12-8-4-3-13



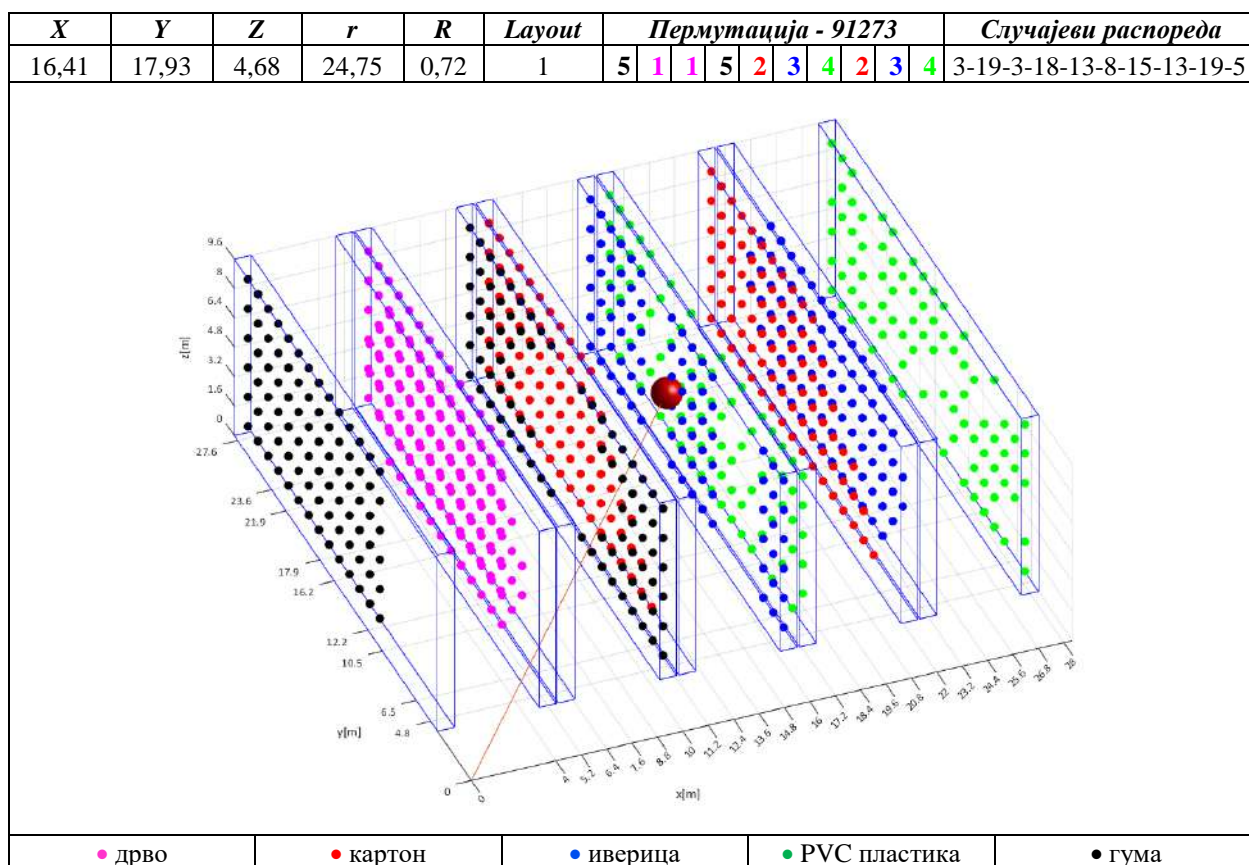
● дрво	● картон	● иверица	● PVC пластика	● гума
--------	----------	-----------	----------------	--------

На основу Табеле 6.35 у којој су приказани резултати оптимизације коришћењем коефицијента емисије w_{ei} , процентом испуњености складишних јединица од 50%, може се закључити следеће:

- Оптимални распоред регала у складишту представљен је у виду layout-а 2,
- Распоред материјала по регалима је: картон – PVC – PVC – дрво – иверица – дрво – иверица – картон – гума – гума, док је редни број пермутације која представља распоред регала у складишту - 38494/113400,
- Регали са гумом, као и у примеру приказаном у Табели 6.33, заузимају почетну и крајњу позицију у складишту.
- Поређењем резултата оптимизације са резултатима приказаним у Табели 6.27, где складишне јединице се гумом такође испуњавају крајње регале и где је попуњавање регала у оквиру Layout-а 2 вршено насумично, може се уочити значајно повећање растојања сфере од почетног положаја. Ово повећање је резултат повећања вредности координата по осама X и Y , што је и примарни циљ оптимизације. Сфера се у овом случају налази у непосредној близини регала са иверицом.

• Испуњеност складишта 50% (тежински коефицијент w_{ci})

Табела 6.36 Излед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ci} и испуњеност складишта од 50% (DE)



Анализом резултата оптимизације добијених применом коефицијента везаног за сагоревање w_{ci} , са процентом испуњености складишта складишним јединицама од 50%, а који су приказани у Табели 6.36 може се закључити следеће:

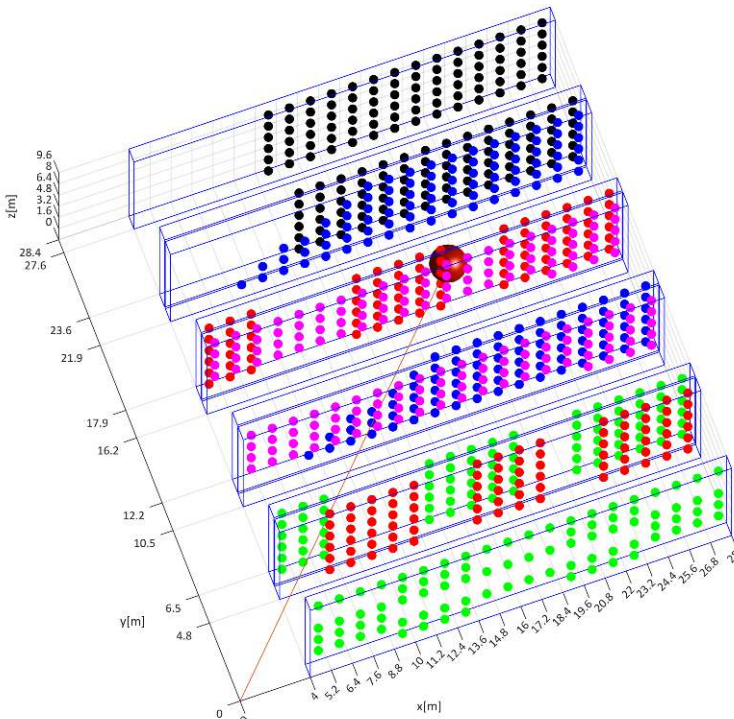
- Оптимални распоред регала у складишту представљен је у виду layout-a 1,
- Распоред материјала по регалима је: гума – дрво – дрво – гума – картон – иверица – PVC – картон – иверица – PVC, а редни број пермутације која представља распоред регала у складишту - 91273/113400,
- Складишне јединице са гумом, испуњавају регале под редним бројевима 1 и 4. Због тога, овакав распоред регала није могуће поредити са распоредима приказаним у Табелама 6.25 и 6.26. Очигледно је да се у овом примеру сфера налази у најудаљенијем положају тј. координате X и Y имају највећу вредност. Са аспекта безбедности и заштите од пожара важно је нагласити да се радијус сфере смањено 3 пута и иста заузима много мањи простор у коридору за евакуацију. У овом случају сфера се налази у близини регала са иверицом.

6.5.2 SARO алгоритам

• Испуњеност складишта 70% (тежински коефицијент w_{ei})

Табела 6.37 Изглед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ei} и испуњеност складишта од 70% (SARO)

X	Y	Z	r	R	Layout	Пермутација - 76291	Случајеви распореда
18,44	18,08	4,96	26,31	1,03	2	4 2 4 1 3 1 2 3 5 5	17-7-8-1-13-1-8-13-3-3



● дрво	● картон	● иверица	● PVC пластика	● гума
--------	----------	-----------	----------------	--------

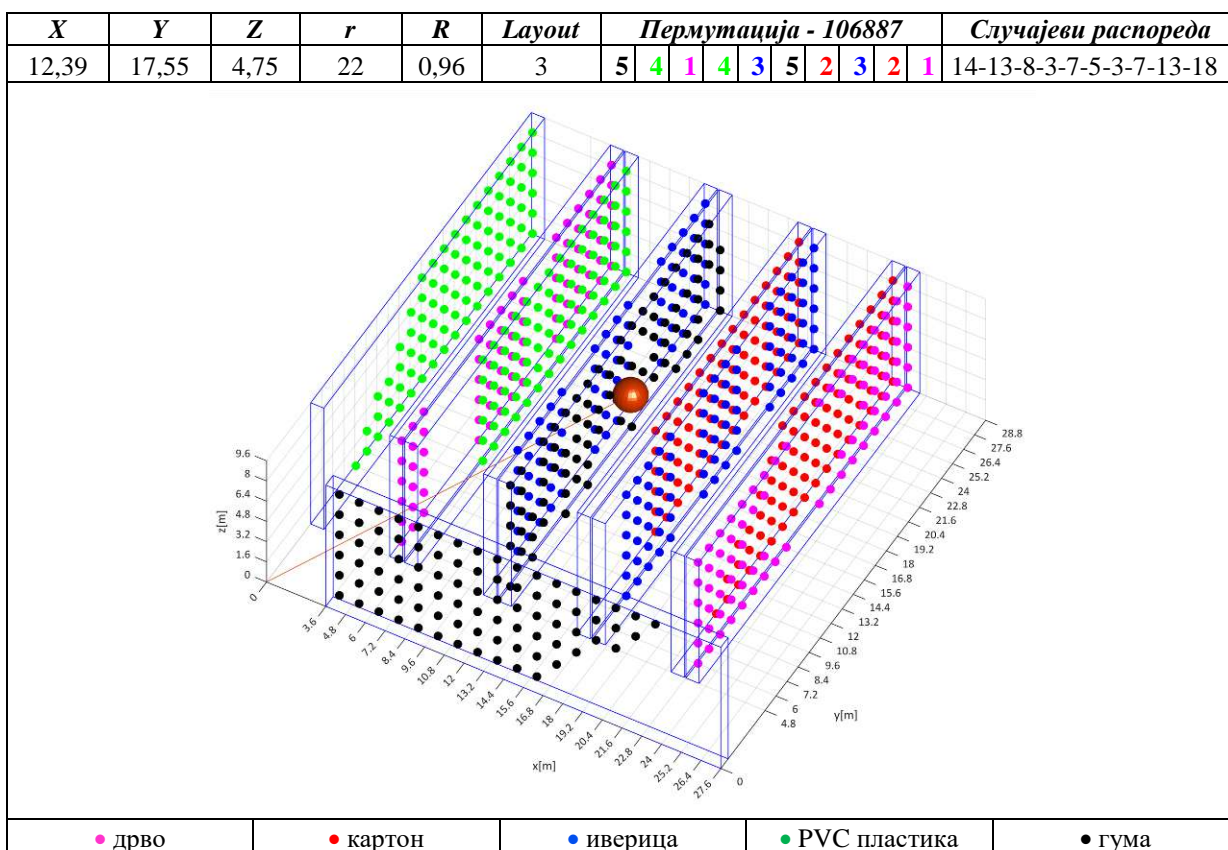
Поређењем резултата оптимизације из Табеле 6.37 са резултатима добијеним применом поступка оптимизације и коришћењем DE алгоритма (видети Табелу 6.33) и резултатима приказаним у Табели 6.19, може се закључити:

- Оптимални распоред регала у складишту је под редним бројем 2,
- Распоред материјала по регалима је: PVC – картон – PVC – дрво – иверица – дрво – картон – иверица – гума – гума, а редни број пермутације која представља распоред регала у складишту - 76291/113400,
- Складишне јединице са гумом заузимају последња два регала као и код случајева приказаним у горе наведеним табелама,
- У поређењу са резултатима из Табела 6.19 и 6.33, где складишне јединице се гумом испуњавају крајње регале и где је попуњавање регала у оквиру layout-а 2, може се запазити да је у овом примеру дошло до промене положаја сфере, односно повећања растојања сфере R од почетног положаја, што је један од циљева оптимизације.

- Регали са гумом заузимају последње две позиције у складишту, што потврђује ранију претпоставку да складишне јединице са гумом морају испуњавати крајње регале, због доминантне вредности тежинског коефицијента w_{ci} за гуму. Оптимални распоред регала на основу начина испуне регала је 17-7-8-1-13-1-8-13-3-3,
- Сфера у овом случају заузима положај близак регалу са картоном.

• **Испуњеност складишта 70% (тежински коефицијент w_{ci})**

Табела 6.38 Изглед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ci} и испуњеност складишта од 70% (SARO)



На основу резултата оптимизације представљеним у Табели 6.38, а који се заснивају на примени коефицијента везаног за сагоревање w_{ci} , може се закључити следеће:

- Оптимални распоред регала у складишту представљен је у виду layout-а 3,
- Распоред материјала по регалима је: гума – PVC – дрво – PVC – гума – иверица – гума – картон – иверица – картон, док је редни број пермутације која представља распоред регала у складишту - 106887/113400,
- Регали испуњени складишним јединицама са гумом налазе се на позицијама 1 и 6, за разлику од варијанти где су регали били распоређени насумично на крају или почетку, или позиционирани применом оптимизације и коришћењем DE алгорита. Из тог

разлога овакав распоред регала није могуће поредити са примерима представљеним у Табелама 6.21, 6.22 и 6.34. Може се закључити, да у односу на претходно наведене варијанте распореда у складишту, сфера која представља потенцијалну зону опасности налази се на највећем растојању од почетног положаја у складишту, захваљујући промени координате Y .

- Оптимални распоред регала на основу начина испуне регала је 14-13-8-3-7-5-3-7-13-18, док је сфера позиционирана у близини регала са гумом.

• **Испуњеност складишта 50% (тежински коефицијент w_{ei})**

Табела 6.39 Изглед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ei} и испуњеност складишта од 50% (SARO)

X	Y	Z	r	R	Layout	Пермутација - 83311										Случајеви распореда
19,71	18,07	5,11	27,22	0,90	2	4	4	1	2	3	1	2	3	5	5	7-9-1-9-18-13-7-13-3-3

● дрво	● картон	● иверица	● PVC пластика	● гума
--------	----------	-----------	----------------	--------

Поређењем резултата оптимизације добијених применом коефицијента везаног за емисију w_{ei} , а који су приказани у Табели 6.39, са резултатима добијеним применом DE алгоритма (видети Табелу 6.35) и резултатима приказаним у Табели 6.27, може се закључити:

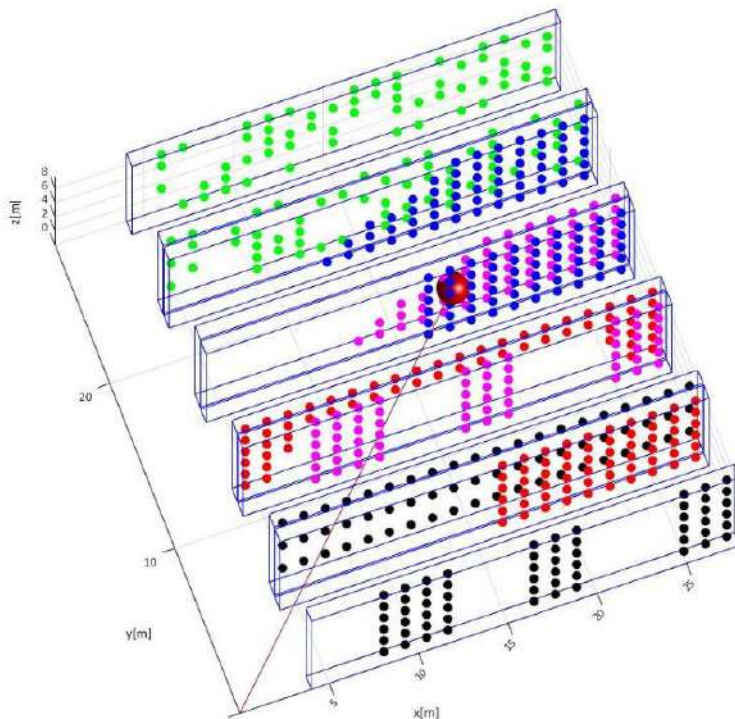
- Оптимални распоред регала у складишту представљен је у виду Layout-a 2.
- Распоред материјала по регалима је: PVC-PVC-дрво-картон-иверица-дрво-картон-иверица-гума-гума, а редни број пермутације која представља распоред регала у складишту 83311/113400.

- Као и код случајева приказаних у горе наведеним табелама, складишне јединице са гумом заузимају последња два регала. У поређењу са резултатима из Табеле 6.27, где складишне јединице се гумом испуњавају крајње регале и где је попуњавање регала у оквиру Layout-а 2 вршено насумично, може се уочити да је у овом примеру дошло до повећања растојања сфере од почетног положаја, што и јесте циљ оптимизације. Такође, поређењем резултата добијених применом SARO алгоритма са резултатима добијеним применом DE алгоритма, уочава се да је задржан тренд пораста растојања сфере у односу на нулту тачку складишта. Забележен је значајан раст координата по свим осама координатног система.
- Регали са гумом заузимају последње две позиције у складишту, што потврђује ранију претпоставку да складишне јединице са гумом морају испуњавати крајње регале, због доминантне вредности тежинског коефицијента w_{e5} за гуму. Оптимални распоред регала на основу начина испуне регала је 7-9-1-9-18-13-7-13-3-3. Сфера у овом случају заузима положај у близини регала са картоном.

• **Испуњеност складишта 50% (тежински коефицијент w_{ci})**

Табела 6.40 Изглед оптималног распореда у складишту са припадајућим параметрима зона опасности од пожара за коефицијент w_{ci} и испуњеност складишта од 50% (SARO)

X	Y	Z	r	R	Layout	Пермутација - 100207								Случајеви распореда		
18,14	17,09	4,89	25,41	0,88	2	5	2	5	1	2	3	1	3	4	4	7-3-17-7-9-3-13-13-5-5



Поређењем резултата оптимизације из Табеле 6.40 са резултатима добијеним на основу насумичног распореда складишних јединица, приказаним у Табели 6.28, може се закључити:

- Оптимални распоред регала у складишту је под редним бројем 2,
- Распоред материјала по регалима је: гума-картон-гума-дрво-картон-иверица-дрво-иверица-PVC-PVC, док је редни број пермутације која представља распоред регала у складишту - 100207/113400,
- Складишне јединице са гумом заузимају регале на позицијама 1 и 3, па је због тога немогуће поредити резултате са резултатима приказаним у Табели 6.28, где складишне јединице са гумом попуњавају прва два регала.
- Може се закључити да у односу на варијанту распореда у складишту (види Табелу 6.28), сфера која представља потенцијалну зону опасности налази се на већем растојању од почетног положаја у складишту, због промене у вредностима координата по X и Y оси.
- Оптимални распоред регала на основу начина испуне регала је 7-3-17-7-9-3-13-13-5-5, док је сфера на позицији између регала са иверицом и дрветом.

6.5.3 Дискусија резултата добијених оптимизацијом

На основу спроведеног поступка оптимизације коришћењем DE алгоритма старијег датума и SARO алгоритма који спада у групу новијих оптимизационих алгоритама, као и резултата приказаних у Табели 6.41, може се закључити следеће:

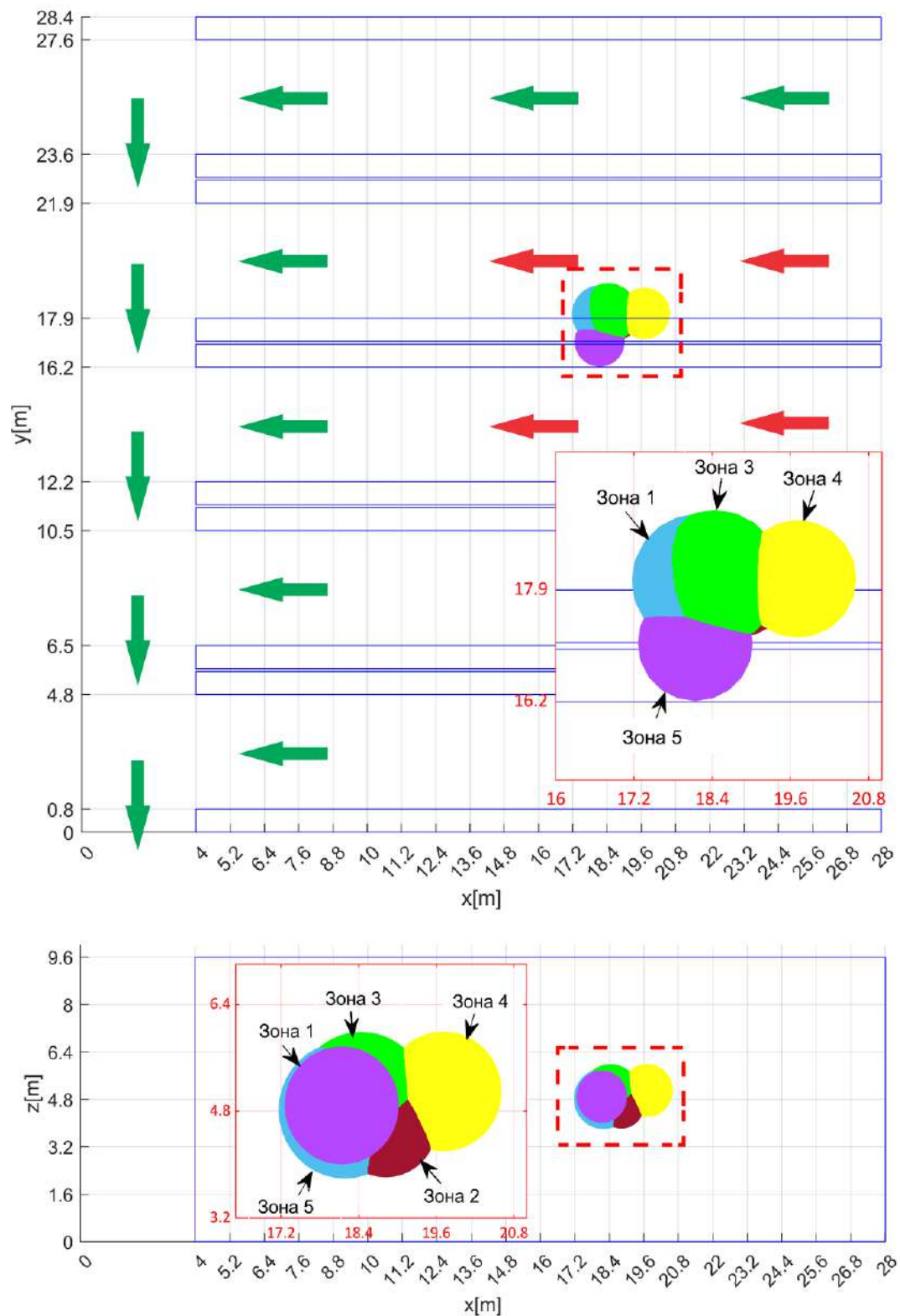
- Коришћењем DE оптимизационог алгоритма, у два од четири карактеристична распореда у складишту, за оптимални распоред је одабран је Layout 2,
- У случају примене SARO оптимизационог алгоритма, у три од четири карактеристична распореда у складишту, за оптимални распоред је одабран је Layout 2,
- Од 5 оптималних решења распореда у складишту, 4 су добијена на основу тежинских коефицијената везаних за емисију штетних продуката сагоревања w_{ei} , док је један од распореда добијен на основу тежинског коефицијента у вези са сагоревањем w_{ci} .
- Код поменута 4 распореда у складишту која су генерисана на основу тежинског коефицијента w_{ei} , крајњи регали у складишту су попуњени складишним јединицама са гумом, што потврђује ранију претпоставку да гума као материјал који је карактеристичан по повећаној емисији штетних продуката испуњава складишне јединице у крајњим регалима.
- Код једног од оптималних распореда у складишту који је добијен на основу тежинског коефицијента за сагоревање w_{ci} , крајњи регали су испуњени складишним јединицама са PVC пластиком, што је исправно, јер поменути материјал има највећу вредност тежинског коефицијента у случају сагоревања.

- Вредност растојања r од почетне тачке складишта, у свих пет случајева има значајно већу вредност од вредности растојања код остала три случаја распореда што је од великог значаја због померања зоне опасности од пожара ка другој половини складишта због безбедности и евакуације.

Табела 6.41 Табеларни приказ решења добијених на основу DE и SARO оптимизационих алгоритама

DE алгоритам код случаја испуњености од 70% (коэффициент w_e) - ЗОНА 1								
X [m]	Y [m]	Z [m]	r [m]	R [m]	Layout	Број пермутације	Распоред регала по материјалима	Случајеви распореда попуњавања регала
18,19	18,04	4,82	26,07	1,03	2	81451	4-3-4-2-1-1-2-3-5-5	6-7-9-13-13-16-12-7-3-3
DE алгоритам код случаја испуњености од 70% (коэффициент w_e)								
X [m]	Y [m]	Z [m]	r [m]	R [m]	Layout	Број пермутације	Распоред регала по материјалима	Случајеви распореда попуњавања регала
12,37	17,01	4,54	21,54	0,86	3	99899	5-2-4-4-2-3-3-1-1-5	20-15-11-3-3-5-13-11-13-10
DE алгоритам код случаја испуњености од 50% (коэффициент w_e) - ЗОНА 2								
X [m]	Y [m]	Z [m]	r [m]	R [m]	Layout	Број пермутације	Распоред регала по материјалима	Случајеви распореда попуњавања регала
18,82	17,98	4,62	26,43	0,80	2	38494	2-4-4-1-3-1-3-2-5-5	7-7-2-3-18-12-8-4-3-13
DE алгоритам код случаја испуњености од 50% (коэффициент w_e)								
X [m]	Y [m]	Z [m]	r [m]	R [m]	Layout	Број пермутације	Распоред регала по материјалима	Случајеви распореда попуњавања регала
16,41	17,93	4,68	24,75	0,72	1	91273	5-1-1-5-2-3-4-2-3-4	3-19-3-18-13-8-15-13-19-5
SARO алгоритам код случаја испуњености од 70% (коэффициент w_e) ЗОНА 3								
X [m]	Y [m]	Z [m]	r [m]	R [m]	Layout	Број пермутације	Распоред регала по материјалима	Случајеви распореда попуњавања регала
18,44	18,09	4,96	26,30	1,03	2	76291	4-2-4-1-3-1-2-3-5-5	17-7-8-1-13-1-8-13-3-3
SARO алгоритам код случаја испуњености од 70% (коэффициент w_e)								
X [m]	Y [m]	Z [m]	r [m]	R [m]	Layout	Број пермутације	Распоред регала по материјалима	Случајеви распореда попуњавања регала
12,39	17,55	4,75	22,00	0,96	3	106887	5-4-1-4-3-5-2-3-2-1	14-13-8-3-7-5-3-7-13-8
SARO алгоритам са испуњеношћу од 50% (коэффициент w_e) - ЗОНА 4								
X [m]	Y [m]	Z [m]	r [m]	R [m]	Layout	Број пермутације	Распоред регала по материјалима	Случајеви распореда попуњавања регала
19,71	18,07	5,10	27,23	0,90	2	83311	4-4-1-2-3-1-2-3-5-5	7-9-1-9-18-13-7-13-3-3
SARO алгоритам са испуњеношћу од 50% (коэффициент w_e) - ЗОНА 5								
X [m]	Y [m]	Z [m]	r [m]	R [m]	Layout	Број пермутације	Распоред регала по материјалима	Случајеви распореда попуњавања регала
18,14	17,09	4,89	25,40	0,88	2	100207	5-2-5-1-2-3-1-3-4-4	7-3-17-7-9-3-13-13-5-5

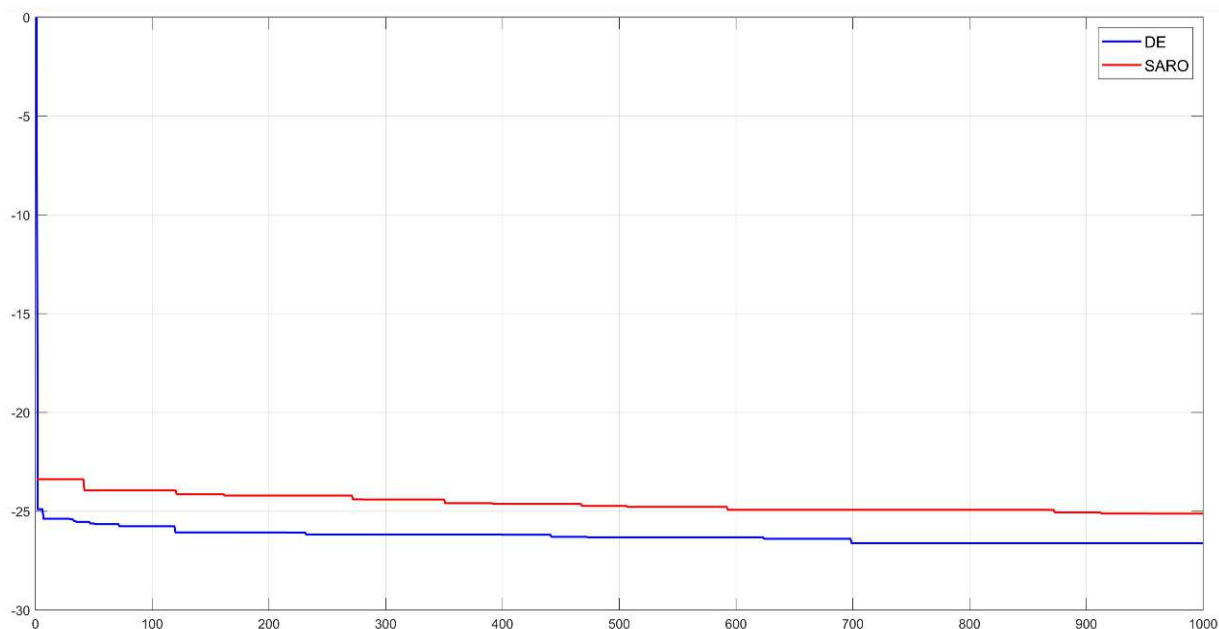
На основу резултата оптимизације у виду 5 карактеристичних случајева распореда (Layout 2) и параметара добијених на основу прорачуна и симулације, креиран је план складишта са припадајућим елементима, у две пројекције (видети Сliku 6.9).



Слика 6.9 План високорегалног складишта који је генерисан на основу резултата оптимизације

На основу података из Табеле 6.41, редом су учртане су зоне опасности од пожара (видети Сliku 6.9), које се на крају групишу у једном делу складишта. Црвеним стрелицама је ограничена критична зона где може доћи до проблема са евакуацијом, док су зеленим стрелицама означени путеви безбедне евакуације из складишта. Укупна запремина која је ограничена поменутиим сферама представља зону која је од значаја за исправно пројектовање складишта, правилно лоцирање система за заштиту од пожара, као и са становишта безбедности и здравља на раду, планирања безбедне евакуације из складишта.

Важно је напоменути да оптимизациони проблеми који су заступљени у различитим областима науке, инжењерства, медицине и многим другим областима зависе од избора параметара, величине простора за претрагу решења и у највећој мери од функције циља. Правилном формулацијом тј. дефинисањем функције циља директно се утиче на ниво тежине оптимизационог проблема [104]. Истраживања на пољу креирања нових оптимизационих алгорита омогућила су решавање широког спектра различитих инжењерских проблема. Наиме, супротно претходној тврдњи, ниједан од до сада развијених оптимизационих алгорита не постиже најбоља решења за било који оптимизациони проблем. Ова тврдња је резултат теоријског истраживачког рада Дејвида Волперта, познатог и као теорема „нема бесплатног ручка“ (NFL - No Free Lunch), која гласи „у просеку код свих оптимизационих проблема, без поновног узорковања, сви алгоритми оптимизације раде подједнако добро“ [105]. Поменута теорема је била мотив за примену два различита оптимизациона алгорита у циљу добијања приближне конфигурације високорегалног складишта.



Слика 6.10 Дијаграм конвергенције најбољег резултата добијеног помоћу DE и SARO алгоритама

Дијаграми конвергенције који одговарају најбољим решењима и који су добијени након 50 независних покретања DE и SARO алгоритама приказани су на Слици 6.10. Како се може приметити са Слике 6.10, алгоритам DE брже конвергира ка оптималном решењу, за разлику од алгоритма SARO код кога је конвергенција ка оптималном решењу спорија.

6.6 Закључне напомене уз 6. поглавље

У овом поглављу представљени су резултати добијени на основу прорачуна зона опасности за различите варијанте конфигурације складишта у виду распореда регала и процентуалне испуњености високорегалног складишта. У одељку 6.1 извршени су прорачун и симулација за 4 различита распореда регала у високорегалном складишту са процентуалном испуњеношћу од 100% и пет врста различитих материјала којима су испуњене складишне јединице. Премештањем два регала са складишним јединицама које су испуњене гумом са позиције крајњих регала у позицију почетних, утврђене су следеће правилности:

- У случају тежинских коефицијената везаних за емисију w_{ei} , зона опасности од пожара код свих Layout-а, независно од начина распореда регала у складишту, гравитира ка регалима испуњених складишним јединицама са гумом.
- У случају тежинских коефицијената везаних за сагоревање w_{ci} код распореда регала у виду Layout-а 1 и 2, центар сфере која представља зону опасности од пожара заузима положај близак средишној линији коридора. Код осталих варијанти распореда регала (Layout 3 и 4) зона опасности од пожара заузима положај у непосредној близини регала испуњених складишним јединицама са иверицом.
- Координата Z код свих варијанти распореда регала у складишту има вредност 4,8 *m*, због чињенице да су регали испуњени дуж целе своје висине од 9,6 *m*.

У одељку 6.2 извршени су прорачун и симулација за 4 различита распореда регала у високорегалном складишту са умањењем укупног броја складишних јединица за 30% и за 7 различитих случајева попуњавања регала складишним јединицама. Процентуални удео сваког од 5 материјала је 20% од укупног броја складишних јединица, респективно. На основу спроведеног прорачуна за све распореде регала у складишту и случајеве попуњавања регала, добијене просторне координате зона опасности од пожара за тежинске коефицијенте w_{ei} и w_{ci} , формиране су две сфере које представљају обједињену зону опасности од пожара. Као и у претходном одељку, зоне опасности од пожара у случају тежинских коефицијената w_{ei} заузимају положај близак регалима испуњених складишним јединицама са гумом.

У одељку 6.3 спроведена је процедура прорачуна и симулације за 4 различита распореда регала у високорегалном складишту са максималном испуњеношћу регала складишним јединицама од 70%. Такође дефинисано је 20 различитих начина попуњавања регала складишним јединицама. Приликом одређивања потенцијалних зона опасности од пожара, насумично је одабрана једна комбинација понуђених случајева распореда складишних јединица у регалима. Увидом у резултате прорачуна и симулације (од Табеле 6.17 до Табеле 6.24), примећене су идентичности у вези са оријентацијом зона опасности од пожара у односу на регале испуњене складишним јединицама са гумом. Примећен је тренд пораста растојања зоне опасности од пожара у односу на почетну (нулту) тачку складишта за све варијанте распореда, у поређењу са примером из одељка 6.1.

Идентично као у претходном, у одељку 6.4 прорачун зона опасности од пожара је извршен на основу једне насумично одабране комбинације случајева попуњавања регала складишним јединицама од 20 расположивих. Као и у претходним одељцима, број различитих распореда регала (Layout-a) је 4, док је укупна испуњеност складишта складишним јединицама 50%. У односу на тренд пораста растојања зоне опасности од почетне тачке складишта (одељак 6.1 и 6.2), овде је примећен тренд смањења растојања за све варијанте распореда. Поменуто смањење растојања зоне опасности од пожара је у директној вези са одабиром начина попуњавања регала, односно у овом одељку, од насумично одабране комбинације случајева попуњавања регала.

У наставку (одељак 6.5), применом DE и SARO оптимизационих алгоритама добијена су приближна решења конфигурације складишта са припадајућим распоредима регала и складишних јединица, за варијанте испуњености од 50 и 70% (види Табелу 6.41 и Сliku 6.9). На основу дефинисане функције циља, пројектних променљивих, задатих ограничења и коришћењем тежинских коефицијената w_{ei} и w_{ci} , одређени су параметри зона опасности од пожара, који за одређене случајеве имају значајно веће вредности у поређењу са вредностима добијеним COG методом. У конкретном случају, вредност параметра R (растојање зоне опасности од пожара од нулте тачке) је већа у односу на вредности овог параметра одређеног поменутом COG методом (видети одељак 6.1-6.4). Овим је остварен циљ оптимизације - зона опасности од пожара је измештена на удаљенију позицију, што са аспекта безбедности и сигурне евакуације из складишта представља значајно унапређење у односу на класични приступ. Истовремено, овим је оправдана примена оптимизационих алгоритама у поступку одређивања приближне конфигурације складишта.

7. ЗАКЉУЧАК

Убрзани развој индустријске производње у претходним деценијама условио је експанзију и раст производних капацитета, а паралелно са њима развијали су се и проширивали и складишни капацитети. Другим речима, раст индустријске производње условио је потребу за обезбеђењем одговарајућих капацитета за складиштење и несметани пласман производа на глобалном нивоу, при чему су развојну улогу у областима логистике и дистрибуције имала високорегална складишта. Са порастом габарита високорегалних складишта и капацитета за складиштење повећала се и рањивост објеката по питању пожара и безбедности и здравља на раду. Из наведених разлога, јавила се потреба за развојем методе за одређивање потенцијалних зона опасности од пожара у објектима за складиштење, тачније високорегалним складиштима. Истраживања спроведена у оквиру ове дисертације имала су за циљ да представе нову методу која ће се примењивати за горе поменуте потребе.

Развијена Воšković-FHZ метода (код дат у Прилогу 1) представља брз и користан алат за процену ризика од пожара у фазама пројектовања нових или адаптације постојећих решења високорегалних складишта. Примењује се за одређивање потенцијалних зона опасности од пожара, а настала је комбиновањем COPRAS методе вишекритеријумског одлучивања, тродимензионалне методе за одређивање параметара складишта и 3D COG методе. Недостаци развијене методе су:

- метода не обухвата промену услова средине у којој се налазе складишне јединице са материјалима;
- начин ширења потенцијалног пожара није узет у обзир;
- промена карактеристика материјала изложених пожару није узета у обзир.

Поменути недостаци произилазе из недостатка временске димезије у математичком моделу. Тренутни математички модел описује складиште у јединственом тренутку пре него што пожар почне. Како математички модел није у функцији од времена, карактеристике материјала, средине и само стање складишта се узимају као константне вредности. Због поменутих недостатака треба напоменути да ова метода није замена за већ

постојеће методе симулације ширења пожара. Предности развијене методе у односу на постојеће (нпр. Густав методу) су:

- Једноставност примене, мањи број потребних параметара и ресурса,
- Једноставна аквизиција података,
- Могућност тродимензионалног приказа зона опасности од пожара.

Ефикасност развијене Воšković-FHZ методе тестирана је на одговарајућим нумеричким примерима при чему су разматрана 4 распореда регала у складишту (layout-a), 5 врста материјала (дрво, картон, иверица, PVC пластика и гума), као и различите варијанте испуњености регала складишним јединицама (50%, 70% и 100%) са подједнаком заступљеношћу свих материјала од 20%. Помоћу COPRAS методе вишекритеријумског одлучивања, за све материјале који се складиште израчунати су тежински коефицијенти (видети Табеле 3.9 и 3.10) који се односе на емисију штетних гасова (w_{ei}) и коефицијенти који се односе на сагоревање (w_{ci}). На основу резултата добијених варијацијом распореда регала у складишту (видети Одељке 6.1-6.4) и процентуалне испуњености регала складишним јединицама, променом позиције ускладиштења материјала у регалима и коришћењем тежинских коефицијената, могу се формулисати следећи закључци:

- Коришћењем тежинских коефицијената везаних за емисију w_{ei} , зона опасности од пожара гравитира ка регалима који су попуњени складишним јединицама са гумом за све случајеве распореда регала у складишту (layout-a) и за све начине попуњавања регала складишним јединицама.
- Употребом тежинског коефицијента w_{ci} , везаног за сагоревање, зона опасности од пожара увек се налази у близини регала који су попуњени складишним јединицама са иверицом и гравитира ка средишној линији коридора независно од распореда регала у складишту (layout-a) и начина попуњавања регала складишним јединицама.
- Максимална вредност координате центра сфере, која представља зону опасности од пожара по оси Z, износи 5,05 m, што је приближно половини висине регала, док је максимална вредност растојања од нулте тачке складишта $r=26,4$ m.

Резултати добијени развијеном Воšković-FHZ методом могу представљати добру полазну основу приликом планирања и пројектовања складишта, распореда регала у објекту, као и приликом пројектовања система за дојаву и гашење пожара, дефинисања превентивних мера и при изради плана евакуације из складишта. Имплементирани поступак заснован на методи описаној у дисертацији може се применити на било које складиште затвореног типа и не односи се само на примере који су разматрани у истој. Имајући у виду поступак којим се генеришу параметри који се односе на материјале у складишту, димензије објекта и распоред складишних јединица, као и начин на који симулација функционише, извршена

је надоградња тј. унапређење методе коришћењем оптимизационих техника и алата. У том смислу, у поглављу 6, побољшање Воšković-FHZ методе постигнуто је применом два савремена биолошки инспирисана оптимизациона алгорита.

Циљ надоградње развијене методе је добијање оптималног решења распореда регала и складишних јединица у складишту са аспекта безбедности од пожара и безбедне евакуације из складишта. У том смислу, у поступку оптимизације примењени су DE и SARO оптимизациони алгорита. Циљ оптимизације, дефинисан функцијом циља, је максимизација растојања потенцијалне зоне опасности од пожара у односу на нулту тачку складишта, чиме се у случају пожара омогућава олакшана евакуација из складишта. За спровођење оптимизационог процеса од кључног значаја је дефинисање следећих пројектних параметара:

- број могућих распореда регала у складишту (layout-a) - 4
- укупан број варијанти распореда регала према врсти материјала којима су попуњени (укупно 5) тј. број пермутација - 113400
- број различитих начина попуњавања регала складишним јединицама - 20

При решавању оптимизационог проблема анализирана су 2 случаја испуњености складишта: 1) 50% испуњености складишта и 2) 70% испуњености складишта. Уведена су и одговарајућа ограничења која дефинишу подручје претраге, као и број регала код којих се може јавити исти начин попуњавања и који је лимитиран на 2. Након спроведеног поступка оптимизације, коришћењем тежинских коефицијената w_{ei} и w_{ci} , добијено је 8 решења распореда регала у складишту са припадајућим параметрима везаним за положај зона опасности и одговарајућим начином попуњавања регала (видети Табелу 6.41). На основу резултата добијених поступком оптимизације, могу се формулисати следећи закључци:

- Коришћењем DE и SARO оптимизационих алгорита, за испуњеност складишта од 50 и 70% и тежинске коефицијенте w_{ei} и w_{ci} , генерисано је укупно 8 различитих конфигурација регала у складишту, од 113400 расположивих. У 5 случајева се као карактеристични распоред појављује Layout 2, па се исти може сматрати оптималним.
- На основу резултата оптимизације генерисан је и план евакуације из високорегалног складишта са припадајућим зонама опасности од пожара и карактеристичним правцима евакуације у случају пожара (видети Слику 6.9).
- Због сужавања простора претраге тј. када се изузме простор између регала који је дефинисан ограничењима, центар зоне опасности увек заузима положај у непосредној близини или у самом подручју регала, за разлику од претходних случајева што је и приказано на Слици 6.9.

- Параметар r који представља растојање зоне опасности од пожара од нулте тачке складишта има значајно веће вредности у поређењу са вредностима добијеним развијеном методом и износи максимално 27,23 m.
- У зависности од распореда и процентуалне испуњености складишта, вредност координате Z , на којој се налази центар сфере, креће се у распону од $4,5 \div 5,1$ m. Поменути опсег вредности координате Z може се сматрати прихватљивим, јер је значајно изнад висине људи, па и уколико до пожара дође, евакуација из складишта може бити спроведена на безбедан начин јер ће се продукти сагоревања по својој природи емитовати ка горњим слојевима.

Горе наведени закључци оправдавају примену оптимизационих алгоритама тј. надоградњу развијене Воšković-FHZ методе у поступку одређивања оптималне конфигурације складишта са припадајућим елементима. Овим је постигнуто значајно унапређење у односу на класични приступ, што је и била једна од хипотеза дефинисаних у оквиру дисертације.

На основу претходно реченог, може се констатовати да истраживања у оквиру дисертације нису коначна и остављају простора за даљи наставак истих. Узимањем у обзир економских и логистичких параметара (који нису разматрани у оквиру дисертације) могућа је даља надоградња методе за одређивање потенцијалних зона опасности од пожара. Постоји велики број параметара који се мењају у функцији времена. С обзиром да време као димензија није разматрано у овом математичком моделу, његовом интеграцијом, ове параметре више не би било могуће посматрати као константе, те би стање складишта, складишних јединица, као и позицију зоне опасности могли одредити у зависности од времена и претпостављених праваца ширења пожара, што је један од праваца даљих истраживања. Осим тога, сведоци смо перманентног развоја нових и унапређења постојећих метахеуристичких оптимизационих алгоритама, што отвара могућности за примену истих у циљу унапређења развијене Воšković-FHZ методе. Ради побољшања ефикасности развијене методе, фокус будућих истраживања биће усмерен на инкорпорирање одређених параметара радног окружења коришћењем других метода вишекритеријумског одлучивања. Циљ је постизање још бољих резултата у оквиру прорачуна и симулације, тј. добијање оптималног решења конфигурације складишта са аспекта безбедности и заштите од пожара. Уз подршку логистичких IoT платформи, вредности тежинских коефицијената као параметара који се односе на материјале и радна окружења могу се квантитативно израчунати. План је да се даље истраживање усмери и на могућности примене вештачке интелигенције у предвиђању и мапирању зона опасности од пожара у складиштима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.V. De Oliveira, C.M.O. Pimentel, R. Godina, J.C.D.O. Matias, S.M.P. Garrido, Improvement of the Logistics Flows in the Receiving Process of a Warehouse, *Logistics* 6 (2022) 22. <https://doi.org/10.3390/logistics6010022>.
- [2] F. Berns, T. Ramsdorf, C. Beecks, Machine Learning for Storage Location Prediction in Industrial High Bay Warehouses, in: A. Del Bimbo, R. Cucchiara, S. Sclaroff, G.M. Farinella, T. Mei, M. Bertini, H.J. Escalante, R. Vezzani (Eds.), *Pattern Recognition. ICPR International Workshops and Challenges*, Springer International Publishing, Cham, 2021: pp. 650–661. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68799-1_47.
- [3] M. Arvidsson, F. Hult, Analysing Fire Risk in Automated High Bay Warehouses—Applying the IEC model for risk analysis on high bay warehouses, *LUTVDG/TVBB–5203–SE* (2006).
- [4] European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs., Efectis., Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung., Centre for Fire Statistics of CTIF., Danish Institute of Fire and Security Technology., Lund University., National Fire Protection Association., University of Edinburgh. School of Engineering., Dutch Burns Foundation. The European Fire Safety Alliance., Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes., EU Firestat project: closing data gaps and paving the way for pan European fire safety efforts: final report, Publications Office, LU, 2022. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/778991> (accessed June 3, 2024).
- [5] W. Ju, G. Su, L. Wu, P.O. Oforiwa, The 3D-Dynamic Fire Risk Evaluation Method of Modern Logistics Warehouses: A Modified Gustav Method, *Fire Technol* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01367-x>.
- [6] J. Saderova, A. Rosova, M. Sofranko, P. Kacmary, Example of Warehouse System Design Based on the Principle of Logistics, *Sustainability* 13 (2021) 4492. <https://doi.org/10.3390/su13084492>.
- [7] Improvement of national reporting, data collection and analysis of occupational accidents and diseases, ILO, Geneva, 2012.
- [8] D. Djurdjevic, M. Andrejić, N. Pavlov, FRAMEWORK FOR IMPROVING WAREHOUSE SAFETY, in: *Proceedings of the 5th International Logistics Conference LOGIC 2022*, Faculty of Transport and Traffic Engineering, Belgrade, 2022. <https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954530.LO>.
- [9] A. Szymonik, Warehouse safety, *Logistics and Transport* 38 (2018) 101–112. <https://doi.org/10.26411/83-1734-2015-2-38-11-18>.
- [10] M.R. Feno, A. Savescu, Safe workplace layout design by joint analysis of workers and material flows, *Procedia Computer Science* 232 (2024) 3074–3082. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.123>.

- [11] M. Stefanov, Current state and improvement prospects of warehouse workers health and safety practices in Bulgarian manufacturing and trading organizations, *AL* 10 (2023) 403–412. <https://doi.org/10.22306/al.v10i3.408>.
- [12] H.-Y. Hsu, M.-H. Hwang, P.-H. Tsou, Applications of BWM and GRA for Evaluating the Risk of Picking and Material-Handling Accidents in Warehouse Facilities, *Applied Sciences* 13 (2023) 1263. <https://doi.org/10.3390/app13031263>.
- [13] Закон о заштити од пожара: 111/2009-25, 20/2015-13, 87/2018-3 (др. закон), 87/2018-41, 87/2018-50 (др. закон), (2018).
- [14] Desimir M. Jovanović, Dušica J. Tomanović, Dinamika požara, Fakultet zaštite na radu, Univerzitet u Nišu, Niš, 2002.
- [15] NFPA 1: Fire Code 2021, 2021 edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2021.
- [16] Emina Mihajlović, Dragan Mlađan, Žarko Janković, Procesi i sredstva za gašenje požara, Fakultet zaštite na radu u Nišu, Niš, 2009.
- [17] D. Živanić, N. Planković, A. Zelić, Fire safety measures in warehouses, in: Ohrid, Macedonia, 2019.
- [18] S. Alkış, E. Aksoy, K. Akpınar, Risk Assessment of Industrial Fires for Surrounding Vulnerable Facilities Using a Multi-Criteria Decision Support Approach and GIS, *Fire* 4 (2021) 53. <https://doi.org/10.3390/fire4030053>.
- [19] G. Bošković, M. Todorović, D. Ubavin, B. Stepanov, V. Mihajlović, M. Perović, Z. Čepić, A New Method for the Determination of Fire Risk Zones in High-Bay Warehouses, *Fire* 7 (2024) 149. <https://doi.org/10.3390/fire7040149>.
- [20] J. Dinaburg, D.T. Gottuk, Fire Detection in Warehouse Facilities, Springer New York, New York, NY, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8115-7>.
- [21] D. Martin, M. Tomida, B. Meacham, Environmental impact of fire, *Fire Sci Rev* 5 (2016) 5. <https://doi.org/10.1186/s40038-016-0014-1>.
- [22] S.M. D'Evelyn, J. Jung, E. Alvarado, J. Baumgartner, P. Caligiuri, R.K. Hagmann, S.B. Henderson, P.F. Hessburg, S. Hopkins, E.J. Kasner, M.A. Krawchuk, J.E. Krenz, J.M. Lydersen, M.E. Marlier, Y.J. Masuda, K. Metlen, G. Mittelstaedt, S.J. Prichard, C.L. Schollaert, E.B. Smith, J.T. Stevens, C.W. Tessum, C. Reeb-Whitaker, J.L. Wilkins, N.H. Wolff, L.M. Wood, R.D. Haugo, J.T. Spector, Wildfire, Smoke Exposure, Human Health, and Environmental Justice Need to be Integrated into Forest Restoration and Management, *Curr Envir Health Rpt* 9 (2022) 366–385. <https://doi.org/10.1007/s40572-022-00355-7>.
- [23] G. Fu, J. Wang, M. Yan, Anatomy of Tianjin Port fire and explosion: Process and causes, *Process Safety Progress* 35 (2016) 216–220. <https://doi.org/10.1002/prs.11837>.
- [24] MBC News., Ann Burns Fire Disasters 33 (2020) 265–266.
- [25] L. Xu, Y. Wang, J. Chen, Analysis of Characteristics of Fire Incident on 24 July 2021 in Jilin Province, China, *Safety* 8 (2022) 65. <https://doi.org/10.3390/safety8030065>.
- [26] M. Tahmid, N. Jahan, N. Tasnim, S.R. Syeda, Major Accident Control in Temporary Storage Facilities: An Investigative Consequence Analysis of the Bangladesh Container Depot Accident 2022, *ACS Chem. Health Saf.* 29 (2022) 494–505. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.2c00055>.
- [27] Richard Campbell, Warehouse Structure Fires, National Fire Protection Association NFPA. Research, Data and Analytics Division, 2022.
- [28] S.M. Tauseef, T. Abbasi, V. Pompapathi, S.A. Abbasi, Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms, *Process Safety and Environmental Protection* 120 (2018) 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.017>.

- [29] M. Kátai-Urbán, T. Bíró, L. Kátai-Urbán, F. Varga, Z. Cimer, Identification Methodology for Chemical Warehouses Dealing with Flammable Substances Capable of Causing Firewater Pollution, *Fire* 6 (2023) 345. <https://doi.org/10.3390/fire6090345>.
- [30] L. Ding, J. Ji, F. Khan, X. Li, S. Wan, Quantitative fire risk assessment of cotton storage and a criticality analysis of risk control strategies, *Fire and Materials* 44 (2020) 165–179. <https://doi.org/10.1002/fam.2761>.
- [31] H. Niu, Z. Li, Application of RAC Method in Fire Risk Assessment of Lithium-ion Battery Factories, *Procedia Engineering* 211 (2018) 1115–1119. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.117>.
- [32] E. Ramezanifar, K. Gholamizadeh, I. Mohammadfam, M. Mirzaei Aliabadi, Risk assessment of methanol storage tank fire accident using hybrid FTA-SPA, *PLoS ONE* 18 (2023) e0282657. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282657>.
- [33] M.J. Jafari, M. Pouyakian, P. Mozaffari, F. Laal, H. Mohamadi, M.T. Pour, S.M. Hanifi, A new approach to chemicals warehouse risk analysis using computational fluid dynamics simulation and fuzzy Bayesian network, *Heliyon* 8 (2022) e12520. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12520>.
- [34] J. Xie, J. Li, J. Wang, J. Jiang, C.-M. Shu, Fire risk assessment in lithium-ion battery warehouse based on the Bayesian network, *Process Safety and Environmental Protection* 176 (2023) 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.005>.
- [35] I. Arandelović, R. Rajić, M. Savanović, Postupci za procenu rizika od požara, *Procteh* 29 (2017) 24. <https://doi.org/10.24094/ptc.017.29.2.24>.
- [36] E. Nukic, J. Marković, Z. Karadzin, S. Mekić, COMPARATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL METHODS FOR PUBLIC BUILDINGS FIRE RISK ASSESSMENT, in: 2022.
- [37] K.A. Pesch-Cronin, N.E. Marion, *Critical Infrastructure Protection, Risk Management, and Resilience: A Policy Perspective*, 2nd ed., Routledge, New York, 2024. <https://doi.org/10.4324/9781003434887>.
- [38] A.S. Qamarani, R. Vikaliana, Application of the hazard identification risk assessment and risk control method in the welding frame body process (a case study in indonesian company), *Jenius* 5 (2024) 1–13. <https://doi.org/10.37373/jenius.v5i1.457>.
- [39] B. Prieto Muñoz, Calculating the risk of fire in community pharmacies. Gustav-Purt method, *Sun* 39 (2023) 307–318. <https://doi.org/10.14482/sun.39.01.378.001>.
- [40] S. Komljenović, D. Stojanović, S. Marković, Implementation of the “Gustav Purt” method in fire risk assessment in military facilities, *Vojno Delo* 69 (2017) 290–302. <https://doi.org/10.5937/vojdela1705290K>.
- [41] Y.T. Zhao, J. Wang, Application of Gustav in Entertainment Places Fire Risk Assessment, *AMM* 668–669 (2014) 1413–1416. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.668-669.1413>.
- [42] K.-O. Choi, M.-W. Park, D.-M. Choi, Improvement of Fire Detection in Rack-type Warehouses using FDS, *Fire Sci. Eng* 33 (2019) 55–60. <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2019.33.5.055>.
- [43] S. Jain, S. Kumar, S. Kumar, T.P. Sharma, Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions, *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 (2008) 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.04.004>.
- [44] S. Tao, X. Dong, Y. Tan, Y. Wei, B. Wang, Y. Huang, Numerical simulation study on the smoke spread process under the influence of the hollow floorboard in the logistics warehouse, *Case Studies in Thermal Engineering* 15 (2019) 100517. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100517>.

- [45] W. Chanthakhot, K. Ransikarbum, Integrated IEW-TOPSIS and Fire Dynamics Simulation for Agent-Based Evacuation Modeling in Industrial Safety, *Safety* 7 (2021) 47. <https://doi.org/10.3390/safety7020047>.
- [46] G. Bošković, Z. Čepić, D. Ubavin, Determination of relative weight coefficients based on thermal characteristics of materials using the F-AHP method, *Engineering Today* 1 (2022) 27–32. <https://doi.org/10.5937/engtoday2204027B>.
- [47] A. Alinezhad, J. Khalili, COPRAS Method, in: *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)*, Springer International Publishing, Cham, 2019: pp. 87–91. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9_12.
- [48] E. Danzi, L. Fiorentini, L. Marmo, FLAME: A Parametric Fire Risk Assessment Method Supporting Performance Based Approaches, *Fire Technol* 57 (2021) 721–765. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01014-9>.
- [49] H. Taherdoost, M. Madanchian, Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts, *Encyclopedia* 3 (2023) 77–87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>.
- [50] V.A. Rutkauskas, E.Zavadskas, F.Peldschus, A.Kaklauskas. MULTIPLE CRITERIA EVALUATION OF PROJECTS IN CONSTRUCTION. Vilnius: Technika, 1994. 226 p. (ISBN 9986-05-046-4), *Statyba* 1 (1995) 90–90. <https://doi.org/10.1080/13921525.1995.10531540>.
- [51] A. Valipour, N. Yahaya, N. Md Noor, J. Antuchevičienė, J. Tamošaitienė, Hybrid SWARA-COPRAS method for risk assessment in deep foundation excavation project: an iranian case study, *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT* 23 (2017) 524–532. <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1281842>.
- [52] C.P. Pandit, M. Chandra, A. Choubey, S. Rajak, Selection of Suitable Material for the Solar Panel Using SWARA and COPRAS Method, in: A. Maurya, A.K. Srivastava, P.K. Jha, S.M. Pandey (Eds.), *Recent Trends in Mechanical Engineering*, Springer Nature Singapore, Singapore, 2023: pp. 153–162. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7709-1_15.
- [53] K.P. Ganesan, J.D.J. Dhillip, V. Sivalingam, A. Duraipalam, G. Seenivasan, G.K. Perumal, B. Karthikeyan, R.K. Rajagopal, M. Chandran, Machinability analysis and optimisation of EDM in AA6082/3 wt% BN/1 wt% MoS₂ hybrid composites using entropy method weights integrated with complex proportional assessment (COPRAS) method, *Int J Adv Manuf Technol* 123 (2022) 4051–4064. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10462-2>.
- [54] A. Balali, A. Valipour, R. Edwards, R. Moehler, Ranking effective risks on human resources threats in natural gas supply projects using ANP-COPRAS method: Case study of Shiraz, *Reliability Engineering & System Safety* 208 (2021) 107442. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107442>.
- [55] S. Sampathkumar, F. Augustin, M.K. Kaabar, X.-G. Yue, An integrated intuitionistic dense fuzzy Entropy-COPRAS-WASPAS approach for manufacturing robot selection, *Advances in Mechanical Engineering* 15 (2023) 168781322311602. <https://doi.org/10.1177/16878132231160265>.
- [56] J. Bolaños-Zuñiga, M.A. Salazar-Aguilar, J.A. Saucedo-Martínez, Solving Location Assignment and Order Picker-Routing Problems in Warehouse Management, *Axioms* 12 (2023) 711. <https://doi.org/10.3390/axioms12070711>.
- [57] Ş. SinemBüyüksaatçı, Carbon Emission Based Optimisation Approach for the Facility Location Problem, *JOR* 4 (2014) 9–20.
- [58] A. Sanjaya, A.C. Sembiring, W. Willyanto, Determination of the optimal distribution centre location with gravity location model, *Journal of Physics: Conference Series* 1402 (2019) 022041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/2/022041>.

- [59] N. Koohathongsumrit, W. Chankham, A hybrid approach of fuzzy risk assessment-based incenter of centroid and MCDM methods for multimodal transportation route selection, *Cogent Engineering* 9 (2022) 2091672. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2091672>.
- [60] M. Yan, Y. Zhang, G.A. Bocobo, Q. Su, K. Zhu, Q. Zhang, J. Tan, A novel tissue separation method for determining upper trunk center of gravity in patients with thoracolumbar kyphosis using MIMICS, *Clinical Biomechanics* 71 (2020) 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.11.002>.
- [61] Z. Li, X. Li, Centroid computation for Shack-Hartmann wavefront sensor in extreme situations based on artificial neural networks, *Opt. Express* 26 (2018) 31675. <https://doi.org/10.1364/OE.26.031675>.
- [62] Jin-Zhuang Xiao, Zhi-Fang Yang, Hong-Rui Wang, and Xin-Cai Yang, Detection Method of Human Three-Dimensional Body Center of Gravity Based on Inclinometer Network, *Sensors and Materials* (2017) 1081. <https://doi.org/10.18494/SAM.2017.1592>.
- [63] G. Bošković, M. Todorović, G. Markovic, Z. Čepić, P. Mladenović, Multi-aisle automated rack warehouse simulation for average travel time, in: *Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, 2023*: pp. A53–A58.
- [64] K. Ch. Varada Rajulu, A. Nandanwar, M. C. Kiran, Evaluation of Smoke Density on Combustion of Wood Based Panel Products, *IJMC* 2 (2013) 225–228. <https://doi.org/10.5923/j.ijmc.20120205.07>.
- [65] Dr. Marcelo Hirschler., *Fire Properties of Polyvinyl Chloride*, (2017). https://www.vinylinfo.org/wp-content/uploads/2018/12/Fire-Properties-of-Polyvinyl-Chloride_0.pdf.
- [66] Myer Kutz, *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02081-8>.
- [67] L. Ding, F. Khan, J. Ji, Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards, *Process Safety and Environmental Protection* 135 (2020) 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.008>.
- [68] C. Chivas, J.-P. Bertrand, C. Malvaux, G. Marlair, K. Tack, Smoke toxicity from combustion products based on polymers containing flame retardant additives, in: *The Flame Retardants Conference 2006*, Interscience communications. London, UK, Londres, United Kingdom, 2006: pp. 59–69. <https://ineris.hal.science/ineris-00976169>.
- [69] B. Ślusarczyk, M. Baryń, S. Kot, Tire Industry Products as an Alternative Fuel, *Pol. J. Environ. Stud.* 25 (2016) 1263–1270. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61543>.
- [70] K.Y. Kwong, L. Mleczko, W. Moujar Bakhti, J.S. Dennis, E.J. Marek, Predictions of burnout times of biomass char using experimentally determined CO to CO₂ ratio, *Chemical Engineering Journal* 450 (2022) 138404. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138404>.
- [71] G. Xiong, D. Zeng, A. Krisman, Y. Wang, On the burning behavior of thermoplastics at large scale: Uncartoned unexpanded plastic commodity, *Fire Safety Journal* 120 (2021) 103089. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103089>.
- [72] M. Baydaş, D. Pamučar, Determining Objective Characteristics of MCDM Methods under Uncertainty: An Exploration Study with Financial Data, *Mathematics* 10 (2022) 1115. <https://doi.org/10.3390/math10071115>.
- [73] M. Amman, T. Rashid, A. Ali, Fermatean fuzzy multi-criteria decision-making based on Spearman rank correlation coefficient, *Granul. Comput.* 8 (2023) 2005–2019. <https://doi.org/10.1007/s41066-023-00421-x>.
- [74] P.-W. Albert, M. Rönnqvist, N. Lehoux, Trends and new practical applications for warehouse allocation and layout design: a literature review, *SN Appl. Sci.* 5 (2023) 378. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05608-0>.

- [75] М. Bošković, *Savremeni pristupi u kinematičkoj i dinamičkoj optimizaciji ravanskih mehanizama*, doktorska disertacija, doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2019.
- [76] G. Miodragović, *Razvoj naprednih biološki inspirisanih algoritama za rešavanje optimizacionih problema primenjene mehanike*, doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, 2015.
- [77] F. Yalaoui, L. Amodeo, E.-G. Talbi, eds., *Heuristics for Optimization and Learning*, Springer International Publishing, Cham, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58930-1>.
- [78] A. Fraser, *Simulation of Genetic Systems by Automatic Digital Computers I. Introduction*, *Australian Journal of Biological Sciences* 10 (1957) 484–491. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:63340476>.
- [79] T. Zhou, *Modeling and Simulation of Emergency Evacuation Planning Paths for Urban Rail Transit Hubs Based on Multilevel Genetic Algorithm*, in: *2023 International Conference on Networking, Informatics and Computing (ICNETIC)*, IEEE, Palermo, Italy, 2023: pp. 571–576. <https://doi.org/10.1109/ICNETIC59568.2023.00124>.
- [80] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi, *Optimization by Simulated Annealing*, *Science* 220 (1983) 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>.
- [81] M. Dorigo, G.A.D. Caro, L.M. Gambardella, *Ant Algorithms for Discrete Optimization*, *Artificial Life* 5 (1999) 137–172. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:990370>.
- [82] M. Dorigo, T. Stützle, *Ant colony optimization*, MIT Press, Cambridge, Mass, 2004.
- [83] J. Kennedy, R. Eberhart, *Particle swarm optimization*, in: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, IEEE, Perth, WA, Australia, 1995: pp. 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.
- [84] *Differential Evolution*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005. <https://doi.org/10.1007/3-540-31306-0>.
- [85] X.S. Yang, X. He, *Firefly algorithm: recent advances and applications*, *IJSI* 1 (2013) 36. <https://doi.org/10.1504/IJSI.2013.055801>.
- [86] X.-S. Yang, S. Deb, *Cuckoo Search via Levy Flights*, (2010). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1003.1594>.
- [87] X.S. Yang, *Bat algorithm for multi-objective optimisation*, *IJBIC* 3 (2011) 267. <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2011.042259>.
- [88] A. Shabani, B. Asgarian, S.A. Gharebaghi, M.A. Salido, A. Giret, *A New Optimization Algorithm Based on Search and Rescue Operations*, *Mathematical Problems in Engineering* 2019 (2019) 1–23. <https://doi.org/10.1155/2019/2482543>.
- [89] A. Alorf, *A survey of recently developed metaheuristics and their comparative analysis*, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 117 (2023) 105622. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105622>.
- [90] X. Liu, B. Sun, Z.-D. Xu, X. Liu, *An adaptive Particle Swarm Optimization algorithm for fire source identification of the utility tunnel fire*, *Fire Safety Journal* 126 (2021) 103486. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103486>.
- [91] Y. Xiang, W. Cao, H. Zheng, Y. Su, *Optimization research on the site selection of fire safety for mega projects sites based on multi-objective particle swarm*, *Evol. Intel.* 15 (2022) 2455–2471. <https://doi.org/10.1007/s12065-020-00520-7>.
- [92] L. Xu, K. Huang, J. Liu, D. Li, Y.F. Chen, *Intelligent planning of fire evacuation routes using an improved ant colony optimization algorithm*, *Journal of Building Engineering* 61 (2022) 105208. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105208>.

- [93] C. Wang, L.C. Wood, H. Li, Z. Aw, A. Keshavarzsaleh, Applied Artificial Bee Colony Optimization Algorithm in Fire Evacuation Routing System, *Journal of Applied Mathematics* 2018 (2018) 1–17. <https://doi.org/10.1155/2018/7962952>.
- [94] K. Rajwar, K. Deep, S. Das, An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges, *Artif Intell Rev* 56 (2023) 13187–13257. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10470-y>.
- [95] A. Shabani, B. Asgarian, M. Salido, S. Asil Gharebaghi, Search and rescue optimization algorithm: A new optimization method for solving constrained engineering optimization problems, *Expert Systems with Applications* 161 (2020) 113698. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113698>.
- [96] C. Lu, H. Yuan, N. Zhang, Nanophotonic devices based on optimization algorithms, in: *Intelligent Nanotechnology*, Elsevier, 2023: pp. 71–111. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85796-3.00004-4>.
- [97] R. Storn, K. Price, Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization* 11 (1997) 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>.
- [98] R. Storn, On the usage of differential evolution for function optimization, in: *Proceedings of North American Fuzzy Information Processing*, IEEE, Berkeley, CA, USA, 1996: pp. 519–523. <https://doi.org/10.1109/NAFIPS.1996.534789>.
- [99] J. Lampinen, A constraint handling approach for the differential evolution algorithm, in: *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No.02TH8600)*, IEEE, Honolulu, HI, USA, 2002: pp. 1468–1473. <https://doi.org/10.1109/CEC.2002.1004459>.
- [100] M.F. Ahmad, N.A.M. Isa, W.H. Lim, K.M. Ang, Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works, *Alexandria Engineering Journal* 61 (2022) 3831–3872. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.013>.
- [101] A. Tharwat, W. Schenck, Population initialization techniques for evolutionary algorithms for single-objective constrained optimization problems: Deterministic vs. stochastic techniques, *Swarm and Evolutionary Computation* 67 (2021) 100952. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100952>.
- [102] Y. Yang, Y. Chen, Y. Wang, C. Li, L. Li, Modelling a combined method based on ANFIS and neural network improved by DE algorithm: A case study for short-term electricity demand forecasting, *Applied Soft Computing* 49 (2016) 663–675. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.07.053>.
- [103] Differential Evolution (DE) - File Exchange - MATLAB Central, (n.d.). <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52897-differential-evolution-de> (accessed September 11, 2024).
- [104] S.P. Adam, S.-A.N. Alexandropoulos, P.M. Pardalos, M.N. Vrahatis, No Free Lunch Theorem: A Review, in: I.C. Demetriou, P.M. Pardalos (Eds.), *Approximation and Optimization*, Springer International Publishing, Cham, 2019: pp. 57–82. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12767-1_5.
- [105] D.H. Wolpert, W.G. Macready, No free lunch theorems for optimization, *IEEE Trans. Evol. Computat.* 1 (1997) 67–82. <https://doi.org/10.1109/4235.585893>.

ПРИЛОЗИ

Прилог 1 - Matlab код методе Воšković-FHZ за прорачун зона опасности од пожара

```
clc; clear; close all;

%% Pravimo tabelu paleta
%% Ucitava INDEX fajlove
INDEX_C=readmatrix('INDEX_C.xls');
INDEX_R=readmatrix('INDEX_R.xls');

%% Unos tezinskih koeficijenata
%% Emisija stetnih produkata
materijal1=0.191791;
materijal2=0.204186;
materijal3=0.216658;
materijal4=0.232129;
materijal5=0.155235;

for i=1:size(INDEX_C,1)
    prekidac=INDEX_C(i,12);
    switch prekidac
        case 1
            INDEX_C(i,12)=materijal1;
        case 2
            INDEX_C(i,12)=materijal2;
        case 3
            INDEX_C(i,12)=materijal3;
        case 4
            INDEX_C(i,12)=materijal4;
        case 5
            INDEX_C(i,12)=materijal5;
        otherwise
            INDEX_C(i,12)=0;
    end
end

INDEX_P=zeros(1,6);

j=0;
for i=1:size(INDEX_C,1)
    j=j+1;

    XC1=INDEX_C(i,2);
    YC1=INDEX_C(i,3);
```



```
ZC1=INDEX_C(i,4);
XC7=INDEX_C(i,5);
YC7=INDEX_C(i,6);
ZC7=INDEX_C(i,7);

XCT=XC1+(XC7-XC1)/2;
YCT=YC1+(YC7-YC1)/2;
ZCT=ZC1+(ZC7-ZC1)/2;

INDEX_P(j,1)=INDEX_C(i,1); %Broj celije koju paleta zauzima
INDEX_P(j,2)=XCT; % X koordinata tezista palete
INDEX_P(j,3)=YCT; % Y koordinata tezista palete
INDEX_P(j,4)=ZCT; % Z koordinata tezista palete
INDEX_P(j,5)=INDEX_C(j,12); % Karakteristika materijala palete
% INDEX_P(j,6)=INDEX_C(i,10); % Materijal
INDEX_P(j,7)=j; % Broj palete
end

%% 1      | 2 | 3 | 4 | 5      | 6      | 7
%% br.celije | X | Y | Z | koeficijent | Materijal | Broj palete

COGX=0;
COGY=0;
COGZ=0;
sumQX=0;
sumQY=0;
sumQZ=0;

sumQ=0;

for i=1:size(INDEX_P,1)
    Qi=INDEX_P(i,5);
    Xi=INDEX_P(i,2);
    Yi=INDEX_P(i,3);
    Zi=INDEX_P(i,4);
    sumQX=sumQX+Qi*Xi;
    sumQY=sumQY+Qi*Yi;
    sumQZ=sumQZ+Qi*Zi;
end

sumQ=sum(INDEX_P(:,5));

COGX=sumQX/sumQ
COGY=sumQY/sumQ
COGZ=sumQZ/sumQ

rastojanje=sqrt(COGX^2+COGY^2)

for i=1:size(INDEX_P,1)
    hold on;
    if INDEX_P(i,5)==materijal1
        scatter3(INDEX_P(i,2),INDEX_P(i,3),INDEX_P(i,4),"magenta","filled");
        hold on;
    elseif INDEX_P(i,5)==materijal2
        scatter3(INDEX_P(i,2),INDEX_P(i,3),INDEX_P(i,4),"red","filled");
        hold on;
    elseif INDEX_P(i,5)==materijal3
```




```
        scatter3(INDEX_P(i,2),INDEX_P(i,3),INDEX_P(i,4),"blue","filled");
        hold on;
    elseif INDEX_P(i,5)==materijal4
        scatter3(INDEX_P(i,2),INDEX_P(i,3),INDEX_P(i,4),"green","filled");
        hold on;
    elseif INDEX_P(i,5)==materijal5
        scatter3(INDEX_P(i,2),INDEX_P(i,3),INDEX_P(i,4),"black","filled");
        hold on;
    end
end

hold on
[x y z]=sphere;
rmin=Inf;
for i=1:size(INDEX_P,1)
    Xr=INDEX_P(i,2)-COGX;
    Yr=INDEX_P(i,3)-COGY;
    Zr=INDEX_P(i,4)-COGZ;

    r=sqrt(Xr^2+Yr^2+Zr^2);
    if r<rmin
        rmin=r;
    end
end
r=rmin
surf(r*x+COGX,r*y+COGY,r*z+COGZ, 'FaceAlpha',.3,'EdgeColor','none')
hold on
xlabel('x[m]');
ylabel('y[m]');
zlabel('z[m]');
nacrtaaj(INDEX_R);
axis equal

%Setting a white background and clean font
set(0,'DefaultFigureColor','White','defaultaxesfontsize',8,'DefaultAxesFontname','Calibri','DefaultTextFontName','Calibri')

%Enhancing the surface characteristics
axis tight
view([13 13])
camlight
lighting phong
shading interp
grid on;
yticks('manual');
xticks('manual');
zticks('manual');
xticks([0 0.8 2.8 3.6 3.8 4.6 6.6 7.4 7.6 8.4 10.4 11.2 11.4 12.2 14.2 15 15.2 16 18 18.8])
yticks([0 1.2 2.4 3.6 4.8 6 7.2 8.4 9.6 10.8 12 13.2 14.4 15.6 16.8 18 19.2 20.4 21.6 22.8 24]);
zticks([0 1.6 3.2 4.8 6.4 8 9.6]);
plot3([0 COGX],[0 COGY],[0 COGZ]);

exportgraphics(gca,'iso.png','Resolution',1200);
view([0 90])
```

Прилог 2 - Matlab код функције циља код DE и SARO оптимizacionих алгоритама

```
%% 1      | 2 | 3 | 4 |      5      |      6      |      7
%% br.celije | X | Y | Z | koeficijent | Materijal | Broj palete

COGX=0;
COGY=0;
COGZ=0;
sumQX=0;
sumQY=0;
sumQZ=0;

sumQ=0;

for i=1:size(INDEX_P,1)
    Qi=INDEX_P(i,5);
    Xi=INDEX_P(i,2);
    Yi=INDEX_P(i,3);
    Zi=INDEX_P(i,4);
    sumQX=sumQX+Qi*Xi;
    sumQY=sumQY+Qi*Yi;
    sumQZ=sumQZ+Qi*Zi;
end

sumQ=sum(INDEX_P(:,5));

COGX=sumQX/sumQ;
COGY=sumQY/sumQ;
COGZ=sumQZ/sumQ;

rastojanje=sqrt(COGX^2+COGY^2+COGZ^2);

Fcilja=-rastojanje;
```

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
Развој методе за одређивање зона опасности од пожара у високорегалним складиштима
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму Инжењерство заштите на раду
1. Опис података
1.1 Врста студије <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> Докторска дисертација
1.2 Врсте података а) квантитативни б) квалитативни
1.3. Начин прикупљања података 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 _____

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека **.xlsx**
- b) SPSS фајл, датотека _____
- c) PDF фајл, датотека **.pdf**
- d) Текст фајл, датотека **.docx**
- e) JPG фајл, датотека **.jpg и .png**
- f) Остало, датотека **.mat**

1.3.2. Број записа (код квантитативних података) **није применљиво**

- a) број варијабли _____
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) _____

1.3.3. Поновљена мерења

- a) да
- б) не**

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између 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?

- a) 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 _____

б) корелационо истраживање, навести тип анализа релевантне литературе

ц) анализа текста, навести тип анализа текста

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

2.2 Квалитет података и стандарди **Није применљиво**

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

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у НаРДус репозиторијум.

3.1.2. URL адреса _____

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? _____

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.

Ауторство – некомерцијално – без прераде

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Горан Бошковић, goranboskovic@gmail.com

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Горан Бошковић, goranboskovic@gmail.com

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Горан Бошковић, goranboskovic@gmail.com