



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Никола З. Коматина

**УНАПРЕЂЕЊЕ ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ
ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНЕ РФМЕА
АНАЛИЗЕ И МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИЈЕ**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2023.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF ENGINEERING

Nikola Z. Komatina

**IMPROVEMENT OF THE PRODUCTION
PROCESS THROUGH THE APPLICATION
OF MODIFIED PFMEA ANALYSIS AND
OPTIMIZATION METHODS**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2023

Аутор
Име и презиме: Никола Коматина
Датум и место рођења: 8. 11. 1993., Чачак
Садашње запослење: Истраживач-сарадник, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Докторска дисертација
Наслов: Унапређење процеса производње применом модификоване PFMEA анализе и метода оптимизације
Број страница: 178
Број слика: 20
Број библиографских података: 258
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Научна област (УДК): 658.5:62
Ментор: др Данијела Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Оцена и одбрана
Датум пријаве теме: 6. 12. 2019.
Број одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације: IV-04-372/6, 23. 6. 2020.
Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата:
<ol style="list-style-type: none"> 1. др Драган Д. Милановић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду 2. др Јасмина Весић Васовић, редовни професор, Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу 3. др Данијела Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу 4. др Александар Алексић, доцент, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу 5. др Марко Ђапан, доцент, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:
<ol style="list-style-type: none"> 1. др Драган Д. Милановић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду 2. др Јасмина Весић Васовић, редовни професор, Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу 3. др Александар Алексић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу 4. др Марко Ђапан, ванредни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу 5. др Снежана Нестић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Датум одбране дисертације:

ЗАХВАЛНИЦА

Ова докторска дисертација је настала као резултат истрајности и преданости истраживачком раду, али и као резултат подрике, посвећености и залагања читавог истраживачког тима. Стога, овом приликом желим да изразим искрену захвалност свим драгим људима који су допринели, како изради ове дисертације, тако и мом личном и професионалном развоју.

Посебну захвалност дугујем мом ментору, проф. др Данијели Тадић, која је својим знањем и саветима неизмерно допринела реализацији ове докторске дисертације. Њена посвећеност, подршка и безрезервно залагање били су од пресудног значаја за постизање мојих досадашњих професионалних резултата. Осим на драгоценом знању које сам стекао од свог ментора, захвалан сам и на њеном утицају на развој моје критичке мисли и способности креативног и аналитичког размишљања.

Неизмерно се захваљујем драгим колегама и сарадницима нашег малог истраживачког тима, односно колегиници Тијани Петровић, као и професорима, др Снежани Нестић и др Александру Алексићу, који су својом стручношћу и саветима значајно допринели коначном изгледу и квалитету ове докторске дисертације. Желим да истакнем да ми је била велика част и задовољство радити са вама и бити део овог тима. Радујем се будућим заједничким изазовима и успесима.

Велику захвалност дугујем мојој породици, мајци Славици, оцу Зорану и брату Страхињи, који су ми увек пружали подрику и били ослонац у свим животним изазовима. Њихова неизмерна посвећеност и жртва коју су поднели због моје добробити је нешто што никада нећу моћи да заборавим.

Највећу захвалност желим да искажем мојој вереници Наташи, чија љубав, подршка и разумевање представљају носиоце мог сваког личног и професионалног успеха. Хвала ти што ме увек охрабрујеш, верујеш у мене и што си ми највећа животна мотивација. Посебно ти хвала што си увек имала разумевање за моје одсуство и време које сам посветио раду и науци. Захваљујући теби, увек сам проналазио вољу и снагу да истрајем у својим намерама и замислима.

У Крагујевцу,

Никола Коматина

2023. године

РЕЗИМЕ

Организација и управљање процесом производње у предузећима аутомобилске индустрије су веома важни и комплексни задаци који захтевају примену различитих метода и техника. На поузданост овог пословног процеса могу утицати бројни фактори, као што су неповољни и небезбедни радни услови, неисправност производне и контролне опреме, неадекватан материјал итд. Поступак идентификације и анализе потенцијалних начина отказа који могу да настану у процесу производње у аутомобилској индустрији заснован је на примени Процесне анализе ефеката и начина отказа (енгл. *Process Failure Mode and Effect Analysis*, скр. *PFMEA*).

У овој докторској дисертацији развијено је укупно пет модела. Прва два модела заснивају на модификацији и унапређењу *PFMEA* анализе, применом метода вишеатрибутивног одлучивања, проширених интервалним фази бројевима типа-2 (енгл. *Interval type-2 fuzzy Multi-Attribute Decision Making*, скр. *IT2FMADM*). У првом моделу је извршена модификација традиционалне *PFMEA* анализе кроз примену Методе најбољи-најлошији проширеном са интервалним фази бројевима типа-2 (енгл. *Interval type-2 fuzzy Best-Worst Method*, скр. *IT2FBWM*). Осим тога, рангирање начина отказа извршено је према упутствима из најновијег *PFMEA* приручника. У другом моделу, развијена је методологија за рангирање начина отказа која се заснива на комбинацији *IT2FBWM* методе и методе Вишекритеријумска оптимизација и компромисно решење проширеном са интервалним фази бројевима типа-2 (скр. *IT2FVIKOR*).

Трећи развијени модел је модел за анализу и избор добављача који се заснива на примени методе Аналитичког хијерархијског процеса (енгл. *Interval type-2 fuzzy Analytic hierarchy process*, скр. *IT2FAHP*) и методе Вишеатрибутивног поређења граница области апроксимације (енгл. *Interval type-2 fuzzy Multi-Attributive Border Approximation area Comparison*, скр. *IT2FMAVAC*), обе проширене са интервалним фази бројевима типа-2. Четврти модел развијен је за анализу фактора који утичу на безбедност и здравље запослених на радном месту. Модел интегрише примену Делфи методе (енгл. *Delphi method*) и две методе за рангирање начина отказа проширене са интервалним фази бројевима типа-2, а то су Техника за одређивање редоследа преференција на основу сличности са идеалним решењем (енгл. *Interval type-2 fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*, скр. *IT2FTOPSIS*) и Метода једноставног отежавања (енгл. *Interval type-2 fuzzy Simple Additive Weighting*, скр. *IT2FSAW*).

Пети модел се односи на примену две хеуристике, Генетског алгоритма (енгл. *Genetic algorithm*, скр. *GA*) и Методе променљивих околина (енгл. *Variable Neighborhood Search*, скр. *VNS*), за одређивање приоритета начина отказа.

Предложени модели тестирани су на подацима који потичу из предузећа аутомобилске индустрије. Разматрана предузећа налазе се на различитим нивоима у ланцу снабдевања аутомобилске индустрије и производе различите врсте производа.

Кључне речи: процес производње, поузданост, *PFMEA*, *IT2FMADM*, хеуристике, аутомобилска индустрија

ABSTRACT

Organization and management of the production process in automotive industry companies are very important and complex tasks that require the application of different methods and techniques. The reliability of this business process can be affected by numerous factors, such as unfavorable and unsafe working conditions, malfunctioning of production and control equipment, inadequate materials, etc. The process of identifying and analyzing potential failure modes that may occur in the automotive industry production process is based on the application of the Process Failure Mode and Effect Analysis (PFMEA) method.

In this doctoral dissertation, a total of five models have been developed. The first two models are based on the modification and improvement of the PFMEA analysis, using Interval type-2 fuzzy Multi-Attribute Decision Making (IT2FMADM) methods. In the first model, a modification of the traditional PFMEA analysis was carried out through the application of the Interval type-2 fuzzy Best-Worst Method (IT2FBWM) with interval type-2 fuzzy numbers. In addition, the ranking of failure modes was performed according to the instructions from the latest PFMEA handbook. In the second model, a methodology for ranking failure modes was developed based on the combination of the IT2FBWM method and the Multi-Criteria Optimization and Compromise Solution method extended with interval type-2 fuzzy numbers (IT2FVIKOR).

The third developed model is a model for the analysis and selection of suppliers, based on the application of the Interval type-2 fuzzy Analytic Hierarchy Process (IT2FAHP) method and the Interval type-2 fuzzy Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (IT2FMABAC) method. The fourth model was developed for the analysis of factors affecting the safety and health of employees in the workplace. The model integrates the application of the Delphi method and two methods for ranking failure modes extended with interval type-2 fuzzy numbers, which are the Interval type-2 fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (IT2FTOPSIS) method and the Interval type-2 fuzzy Simple Additive Weighting (IT2FSAW) method.

The fifth model refers to the application of two heuristics, the Genetic Algorithm (GA) and the Variable Neighborhood Search (VNS), to determine the priorities of failure modes.

The proposed models were tested on data originating from companies in the automotive industry. The considered companies are located at different levels in the automotive supply chain and produce different types of products.

Key words: *production process, reliability, PFMEA, IT2FMADM, heuristics, automotive industry*

САДРЖАЈ

Списак слика.....	I
Списак табела	II
Списак скраћеница	IV
1. УВОД.....	1
1.1 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА	3
1.2 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	3
1.3 ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ.....	4
1.4 МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА	4
1.5 ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА	4
1.6 ОКВИРНИ САДРЖАЈ РАДА.....	5
2. ОСНОВНА ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА О ФАЗИ СКУПОВИМА, <i>FMEA</i> АНАЛИЗИ И МЕТОДАМА ВИШЕАТРИБУТИВНОГ ОДЛУЧИВАЊА.....	7
2.1 ФАЗИ ЛОГИКА И ТЕОРИЈА ФАЗИ СКУПОВА	7
2.1.1 Концепт фази логике и фази скупова	7
2.1.2 Фази скупови типа-2	10
2.2 ОСНОВНА РАЗМАТРАЊА О <i>FMEA</i> АНАЛИЗИ	18
2.2.1 Основни појмови у традиционалној <i>FMEA</i> анализи	20
2.2.2 Поступак примене традиционалне <i>FMEA</i> анализе.....	21
2.2.3 Недостаци и ограничења традиционалне <i>FMEA</i> анализе	25
2.2.4 <i>FMEA</i> у аутомобилској индустрији	27
2.2.5 Карактеристике <i>PFMEA</i> анализе према <i>AIAG&VDA FMEA HANDBOOK</i> приручнику.....	29
2.3 МЕТОДЕ ВИШЕАТРИБУТИВНОГ ОДЛУЧИВАЊА	37
2.3.1 Класификација метода вишеатрибутивног одлучивања.....	39
2.3.2 Основни поступак примене метода вишеатрибутивног одлучивања.....	41
2.4 ДОМЕН ПРИМЕНЕ И МЕТОДОЛОШКЕ МОДИФИКАЦИЈЕ <i>FMEA</i> АНАЛИЗЕ	48
2.5 <i>MADM</i> МЕТОДЕ ПРОШИРЕНЕ СА <i>IT2FNs</i>	51
2.5.1 <i>IT2FAHP</i>	51
2.5.2 <i>IT2FBWM</i>	53
2.5.3 <i>IT2FTOPSIS</i>	55
2.5.4 <i>IT2FMAVAC</i>	57
2.5.5 <i>IT2FVIKOR</i>	58
2.6 КОМБИНАЦИЈА <i>FMEA</i> АНАЛИЗЕ И <i>MADM</i> МЕТОДА.....	59

3. ОСНОВНА ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА О ПРИМЕЊЕНИМ ОПТИМИЗАЦИОНИМ МЕТОДАМА.....	62
3.1 ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ	65
3.1 МЕТОДА ПРОМЕНЉИВИХ ОКОЛИНА.....	67
4. ПРЕДЛОЖЕНИ МОДЕЛИ ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНЕ <i>PFMEA</i> АНАЛИЗЕ И МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИЈЕ.....	69
4.1 МОДИФИКОВАНИ <i>PFMEA</i> ПРИСТУП ЗАСНОВАН НА <i>IT2FBWM</i> И <i>AP</i> МЕТОДОЛОГИЈИ.....	71
4.1.1 Моделовање релативне важности аспеката фактора ризика озбиљност последице	73
4.1.2 Моделовање неизвесних вредности фактора ризика озбиљност последице	74
4.1.3 Предложени алгоритам.....	75
4.2 МОДИФИКОВАНИ <i>PFMEA</i> ПРИСТУП ЗАСНОВАН НА <i>IT2FBWM</i> И <i>IT2FVIKOR</i>	77
4.2.1 Моделовање релативне важности фактора ризика.....	79
4.2.2 Моделовање неизвесних вредности фактора ризика	80
4.2.3 Предложени алгоритам.....	81
4.3 МОДЕЛ ЗА ОЦЕНУ И ИЗБОР ДОБАВЉАЧА У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ.....	85
4.3.1 Моделовање релативне важности <i>SSCs</i>	88
4.3.2 Моделовање неизвесних вредности <i>SSCs</i>	89
4.3.3 Предложени алгоритам.....	90
4.4 МОДЕЛ ЗА АНАЛИЗУ ФАКТОРА КОЈИ УТИЧУ НА БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ ЗАПОСЛЕНИХ НА РАДНОМ МЕСТУ У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ	93
4.4.1 Моделовање релативне важности <i>HOTRFs</i>	95
4.4.2 Моделовање неизвесних вредности <i>HOTRFs</i>	96
4.4.3 Предложени алгоритам.....	96
4.5 МОДЕЛ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ СКУПА НАЧИНА ОТКАЗА ЗАСНОВАН НА <i>IT2FANP</i> И МЕТАХЕУРИСТИЧКОМ ПРИСТУПУ	98
4.5.1 Моделовање релативне важности <i>RFs</i>	101
4.5.2 Моделовање неизвесних вредности трошкова застоја	102
4.5.3 Предложени математички модел	102
4.5.4 Оптимизациона решења.....	104

5. СТУДИЈЕ СЛУЧАЈА	109
5.1 ОДРЕЂИВАЊЕ ПРИОРИТЕТА НАЧИНА ОТКАЗА ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНОГ <i>PFMEA</i> ПРИСТУПА ЗАСНОВАНОГ НА <i>IT2FBWM</i> И <i>AP</i> МЕТОДОЛОГИЈИ.....	110
5.2 ОДРЕЂИВАЊЕ ПРИОРИТЕТА НАЧИНА ОТКАЗА ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНОГ <i>PFMEA</i> ПРИСТУПА ЗАСНОВАНОГ НА <i>IT2FBWM</i> И <i>IT2FVIKOR</i>	118
5.3 ОЦЕНА И ИЗБОР ДОБАВЉАЧА У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ.....	126
5.4 АНАЛИЗА ФАКТОРА КОЈИ УТИЧУ НА БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ ЗАПОСЛЕНИХ НА РАДНОМ МЕСТУ У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ	133
5.5 ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ СКУПА НАЧИНА ОТКАЗА ЗАСНОВАНО НА <i>IT2FANP</i> И МЕТАХЕУРИСТИЧКОМ ПРИСТУПУ	142
6. ЗАКЉУЧАК.....	148
ЛИТЕРАТУРА.....	152
ПРИЛОГ	169

Списак слика

Ознака	Назив слике
Слика 2.1	Различити облици функције припадности за фази скупове типа-1: а) облик Гаусове криве, б) троугаони и в) трапезоидни облик
Слика 2.2	3D приказ $GT2FSs$ облика Гаусове криве
Слика 2.3	Разлика између $GT2FSs$ (а) и $IT2FSs$ (б)
Слика 2.4	$IT2TFSs$ (а) и $IT2TrFSs$ (б)
Слика 2.5	Поједини примери симетричних $IT2FSs$: $IT2TFSs$ (а, б) и $IT2TrFSs$ (в, г)
Слика 2.6	Основни кораци традиционалне $FMEA$ анализе
Слика 2.7	Општи изглед ланца снабдевања у аутомобилској индустрији
Слика 2.8	Теоријски модел ланца отказа
Слика 2.9	Основна класификација метода вишеатрибутивног одлучивања
Слика 3.1	Класификација хеуристичких оптимизационих метода на основу њихових својстава
Слика 3.2	Поступак примене основног Генетског алгоритма
Слика 3.3	Поступак примене основне Методе променљивих околина
Слика 4.1	Предложени $PFMEA$ модел заснован на $IT2FBWM$ и AP методологији
Слика 4.2	Предложени $PFMEA$ модел заснован на $IT2FBWM$ и $IT2FVIKOR$
Слика 4.3	Предложени модел за оцену и избор добављача
Слика 4.4	Предложени модел за одређивање оптималног скупа начина отказа
Слика 4.5	Поступак примене Генетског алгоритма за решавање проблема избора скупа начина отказа
Слика 4.6	Поступак примене Методе променљивих околина за решавање проблема избора скупа начина отказа
Слика 5.1	Предложени приступ за унапређење процеса производње применом модификоване $PFMEA$ анализе и метода оптимизације
Слика 5.2	Припадност добављача областима апроксимације

Списак табела

Ознака	Назив табеле
Табела 2.1	Традиционална <i>FMEA</i> скала за озбиљност ефекта, <i>S</i>
Табела 2.2	Традиционална <i>FMEA</i> скала за учесталост појаве отказа, <i>O</i>
Табела 2.3	Традиционална <i>FMEA</i> скала за могућност детекције узрока појаве отказа, <i>D</i>
Табела 2.4	Скала мера и упутство за процену озбиљности последице (<i>S</i>) према <i>FMEA Handbook</i> приручнику
Табела 2.5	Скала мера и упутство за процену учесталости појаве начина отказа (<i>O</i>) према <i>FMEA Handbook</i> приручнику
Табела 2.6	Скала мера и упутство за процену могућности детекције начина отказа (<i>D</i>) према <i>FMEA Handbook</i> приручнику
Табела 2.7	Приоритет акција (<i>AP</i>)
Табела 2.8	Примена <i>FMEA</i> анализе у различитим научним областима
Табела 2.9	Коришћени <i>IT2FAHP</i> приступи у релевантној литератури
Табела 2.10	Коришћени <i>IT2FBWM</i> приступи у релевантној литератури
Табела 2.11	Коришћени <i>IT2FTOPSIS</i> приступи у релевантној литератури
Табела 2.12	Коришћени <i>IT2FMABAC</i> приступи у релевантној литератури
Табела 2.13	Коришћени <i>IT2FVIKOR</i> приступи у релевантној литератури
Табела 2.14	Примена интегрисаног <i>FMEA - MADM</i> приступа
Табела 3.1	Класификација метахеуристика
Табела 4.1	Озбиљност последица које настају услед реализације отказа са аспекта важности производа и трошкова
Табела 4.2	Лингвистички искази и одговарајући <i>IT2TFNs</i> коришћени за описивање вредности фактора ризика <i>S</i> и <i>D</i>
Табела 4.3	Лингвистички искази и одговарајући <i>IT2TFNs</i> коришћени за описивање вредности фактора ризика <i>O</i>
Табела 4.4	Параметри укрштања и мутације за примену Генетског алгоритма
Табела 5.1	Улазни подаци (израчунате вредности и процене вредности фактора ризика <i>S</i> , <i>O</i> и <i>D</i>) са финалне линије контроле квалитета
Табела 5.2	Фактор ризика <i>S</i> за разматране начине отказа
Табела 5.3	Поређење приоритета начина отказа када се у обзир узимају три аспекта фактора ризика <i>S</i> и када се у обзир узима само аспект квалитета
Табела 5.4	Фактор ризика <i>S</i> за разматране начине отказа (контрола квалитета производа током реализације процеса производње)

Ознака	Назив табеле
Табела 5.5	Поређење приоритета начина отказа када се у обзир узимају три аспекта фактора ризика S и када се у обзир узима само аспект квалитета (контрола квалитета производа током реализације процеса производње)
Табела 5.6	Фактор ризика S за разматране начине отказа (процес планирања, наручивања и контроле улазног материјала)
Табела 5.7	Поређење приоритета начина отказа када се у обзир узимају три аспекта фактора ризика S и када се у обзир узима само аспект квалитета (процес планирања, наручивања и контроле улазног материјала)
Табела 5.8	Процењене вредности фактора ризика
Табела 5.9	Отежане вредности фактора ризика, као и фази позитивно и фази негативно идеално решење
Табела 5.10	Компромисна ранг листа
Табела 5.11	Фази оцене добављача према поткритеријума унутар сваког разматраног SSC
Табела 5.12	Нормализована агрегирана фази матрица одлучивања
Табела 5.13	Отежана нормализована агрегирана фази матрица одлучивања
Табела 5.14	Припадност добављача $BAAs$
Табела 5.15	Дистанца добављача од $BAAs$ и вредност критеријумске функције добављача
Табела 5.16	Људски, организациони и технички/технолошки фактори ($HOTRFs$)
Табела 5.17	Процене релативне важности $HOTRFs$ и њихове агрегиране вредности применом Делфи методе
Табела 5.18	Фази матрица одлучивања
Табела 5.19	Отежана фази матрица одлучивања
Табела 5.20	Ранг разматраних $HOTRFs$ одређен применом метода $IT2FTOPSIS$ и $IT2FSAW$
Табела 5.21	Коефицијент сличности рангирања, WS
Табела 5.22	Улазни подаци за четврти узорак (93 начина отказа)
Табела 5.23	Оптималан скуп начина отказа на нивоу сваког анализираног $FMEA$ извештаја одређен применом Генетског алгоритма
Табела 5.24	Оптималан скуп начина отказа на нивоу сваког анализираног $FMEA$ извештаја одређен применом Методе променљивих околина

Списак скраћеница

Скраћеница	Значење
<i>AHP</i>	енгл. <i>Analytic Hierarchy Process</i>
<i>AIAG</i>	енгл. <i>Automotive Industry Action Group</i>
<i>ANP</i>	енгл. <i>Analytic Network Process</i>
<i>AP</i>	енгл. <i>Action Priority</i>
<i>APQP</i>	енгл. <i>Advanced Product Quality Planning</i>
<i>ARAS</i>	енгл. <i>Additive Ratio ASsessment</i>
<i>BAA</i>	енгл. <i>Border approximation area matrix</i>
<i>BWM</i>	енгл. <i>Best-Worst Method</i>
<i>CA</i>	енгл. <i>Criticality Analysis</i>
<i>COPRAS</i>	енгл. <i>COmplex PROportional ASsessment</i>
<i>CPN</i>	енгл. <i>Cost Priority Number</i>
<i>CR</i>	енгл. <i>Consistency Ratio</i>
<i>CRPN</i>	енгл. <i>Cost and Risk based Priority Numbers</i>
<i>CW</i>	енгл. <i>Computing with Words</i>
<i>D</i>	енгл. <i>Detection</i>
<i>DEMATEL</i>	енгл. <i>DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory</i>
<i>DFMEA</i>	енгл. <i>Design Failure Mode and Effect Analysis</i>
<i>DMAIC</i>	енгл. <i>Define, Measure, Analyze, Improve and Control</i>
<i>ELECTRE</i>	франц. <i>ÉLimination Et Choix Traduisant la RÉalité</i>
<i>EMS</i>	енгл. <i>Environmental Management System</i>
<i>FBO</i>	енгл. <i>fuzzy best to others</i>
<i>FMEA</i>	енгл. <i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
<i>FMEA-MSR</i>	енгл. <i>Supplemental FMEA for Monitoring & System Response</i>
<i>FMECA</i>	енгл. <i>Failure Mode, Effect and Criticality Analysis</i>
<i>FNIS</i>	енгл. <i>fuzzy negative ideal solution</i>
<i>FOW</i>	енгл. <i>fuzzy other to worst</i>
<i>FOWA</i>	енгл. <i>Fuzzy Ordered Weighted Averaging</i>
<i>FPIS</i>	енгл. <i>fuzzy positive ideal solution</i>
<i>FPOWA</i>	енгл. <i>Fuzzy Probabilistic Ordered Weighted Averaging</i>
<i>FRN(s)</i>	енгл. <i>Fuzzy Rough Number(s)</i>
<i>FRS(s)</i>	енгл. <i>Fuzzy Rough Set(s)</i>
<i>FS(s)</i>	енгл. <i>Type-1 Fuzzy Set(s)</i>
<i>GA</i>	енгл. <i>Genetic algorithm</i>
<i>GT2FS(s)</i>	енгл. <i>General Type-2 Fuzzy Set(s)</i>
<i>H</i>	енгл. <i>Priority High</i>

Скраћеница	Значење
<i>HACCP</i>	енгл. <i>Hazard Analysis and Critical Control Points</i>
<i>HOTRF(s)</i>	енгл. <i>Human, Organizational, and Technical/Technological Risk Factor(s)</i>
<i>IATF</i>	енгл. <i>International Automotive Task Force</i>
<i>IFS(s)</i>	енгл. <i>Intuitionistic Fuzzy Set(s)</i>
<i>IRP</i>	енгл. <i>Ideal Reference Point</i>
<i>IT2FAHP</i>	енгл. <i>Interval type-2 fuzzy Analytic Hierarchy Process</i>
<i>IT2FBWM</i>	енгл. <i>Interval type-2 fuzzy Best-Worst Method</i>
<i>IT2FMABAC</i>	енгл. <i>Interval type-2 fuzzy Multi-Attributive Border Approximation area Comparison</i>
<i>IT2FMADM</i>	енгл. <i>Interval type-2 fuzzy Multi-Attribute Decision Making</i>
<i>IT2FN(s)</i>	енгл. <i>Interval Type-2 Fuzzy Number(s)</i>
<i>IT2FS(s)</i>	енгл. <i>Interval Type-2 Fuzzy Set(s)</i>
<i>IT2FSAW</i>	енгл. <i>Interval type-2 fuzzy Simple Additive Weighting</i>
<i>IT2FTOPSIS</i>	енгл. <i>Interval type-2 fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
<i>IT2FVIKOR</i>	Метода Вишекритеријумска оптимизација и компромисно решење проширена са интервалним фази бројевима типа-2
<i>IT2TFN(s)</i>	енгл. <i>Interval Type-2 Triangular Fuzzy Number(s)</i>
<i>IT2TFS(s)</i>	енгл. <i>Interval Type-2 Triangular Fuzzy Set(s)</i>
<i>IT2TrFN(s)</i>	енгл. <i>Interval Type-2 Trapezoidal Fuzzy Number(s)</i>
<i>IT2TrFS(s)</i>	енгл. <i>Interval Type-2 Trapezoidal Fuzzy Set(s)</i>
<i>IVIFN(s)</i>	енгл. <i>Interval-valued intuitionistic fuzzy number(s)</i>
<i>L</i>	енгл. <i>Priority Low</i>
<i>M</i>	енгл. <i>Priority Medium</i>
<i>MABAC</i>	енгл. <i>Multi-Attributive Border Approximation area Comparison</i>
<i>MADM</i>	енгл. <i>Multi-Attribute Decision Making</i>
<i>MAUT</i>	енгл. <i>Multi-Attribute Utility Theory</i>
<i>MAV</i>	енгл. <i>Multi-Attribute Value function</i>
<i>MCDM</i>	енгл. <i>Multi-Criteria Decision-Making</i>
<i>MODM</i>	енгл. <i>Multi-Objective Decision Making</i>
<i>NASA</i>	енгл. <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>O</i>	енгл. <i>Occurrence</i>
<i>OEM</i>	енгл. <i>Original Equipment Manufacturer</i>
<i>ORESTE</i>	франц. <i>Organisation, rangement et synthèse de données relationnelles</i>
<i>OSH</i>	енгл. <i>Occupational Safety and Health</i>
<i>OWA</i>	енгл. <i>Ordered Weighted Averaging</i>
<i>PFMEA</i>	енгл. <i>Process Failure Mode and Effect Analysis</i>

Скраћеница	Значење
<i>PFS(s)</i>	енгл. <i>Pythagorean Fuzzy Set(s)</i>
<i>PPAP</i>	енгл. <i>Production Part Approval Process</i>
<i>PROMETHEE</i>	енгл. <i>Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation</i>
<i>QMS</i>	енгл. <i>Quality Management System</i>
<i>RPN</i>	енгл. <i>Risk priority number</i>
<i>S</i>	енгл. <i>Severity</i>
<i>SMAA</i>	енгл. <i>Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis,</i>
<i>SMART</i>	енгл. <i>Simple Multi-Attribute Rating Technique</i>
<i>SSC(s)</i>	енгл. <i>supplier selection criteria(s)</i>
<i>SVN(s)</i>	енгл. <i>Single-valued neutrosophic sets</i>
<i>T2FN(s)</i>	енгл. <i>Type-2 Fuzzy Number(s)</i>
<i>T2FS(s)</i>	енгл. <i>Type-2 Fuzzy Set(s)</i>
<i>TFS(s)</i>	енгл. <i>Triangular Fuzzy Set(s)</i>
<i>TODIM</i>	порт. <i>TOmada de Decisão Interativa e Multicritério</i>
<i>TOPSIS</i>	енгл. <i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
<i>TrFS(s)</i>	енгл. <i>Trapezoidal Fuzzy Set(s)</i>
<i>VDA</i>	нем. <i>Verband der Automobilindustrie</i>
<i>VIKOR</i>	Вишекритеријумска оптимизација и компромисно решење
<i>VNS</i>	енгл. <i>Variable Neighborhood Search</i>
<i>WASPAS</i>	енгл. <i>Weighted Aggregated Sum Product ASsessment</i>

1. УВОД

Аутомобилска индустрија је један од кључних покретача привредног развоја многих држава. Као једна од најважнијих грана индустрије има велики утицај на друштвени развој, као и на развој и одрживост других привредних делатности. У аутомобилској индустрији је запослен велики број људи, па се може тврдити да је ова врста индустрије веома значајна и са друштвеног аспекта. Осим тога, аутомобилска индустрија има велики значај и у економском домену, јер има битан удео у бруто домаћем производу многих земаља. Узимајући у обзир релевантну литературу из области аутомобилске индустрије, као и искуства добре праксе, може се рећи да је аутомобилска индустрија једна од најинтересантнијих области за примену савремених научних метода и концепата. Научна истраживања у области аутомобилске индустрије су разноврсна и обухватају широк спектар истраживачких проблема, као што су развој нових материјала, оптимизација дизајна производа, развој алтернативних погонских система, примена вештачке интелигенције у производњи и експлоатацији, оптимизација процеса производње, развој метода и техника контроле квалитета и др.

Предузећа која послују у оквиру аутомобилске индустрије су умрежена и део су ланца снабдевања. Стога, може се рећи да су предузећа аутомобилске индустрије међусобно зависна и да свако предузеће има посредан или непосредан утицај на пословање осталих чланова ланца снабдевања. Како би се обезбедила правовремена испорука производа захтеваног квалитета у ланцу снабдевања, неопходно је на нивоу сваког предузећа успоставити довољно поуздан процес производње и његових пратећих процеса и функција, попут одржавања, логистике и контроле квалитета. Из тог разлога се проблем поузданости процеса производње сматра једним од најважнијих проблема оперативног менаџмента. Поуздан процес производње је један од кључних фактора конкурентности и опстанка на тржишту.

Поузданост процеса производње огледа се у могућности да се обезбеди захтеван квалитет производа, са што мањим трошковима, краћим временом чекања, мањим бројем застоја проузрокованих отказом производне опреме или грешкама које настају као последица деловања људског фактора, уз што мањи проценат неусаглашених производа. За унапређење поузданости процеса производње у пракси се користе различите методе, анализе и технике. Једна од најважнијих метода ове намене је *PFMEA* анализа, односно „Анализа начина и ефеката отказа” (енгл. *Failure Mode and Effect Analysis*, скр. *FMEA*), посебно прилагођена процесу производње у аутомобилској индустрији. Циљ примене ове методе је да се идентификују и анализирају потенцијални начини отказа, који се могу манифестовати на различите начине, као и да се утврде одговарајуће мере за елиминисање или смањење њиховог негативног утицаја. Начинима отказа могу се сматрати неисправност производне опреме, грешке оператера, неадекватан материјал, неповољан утицај фактора радне средине, неадекватан транспорт и др.

Примена *FMEA* анализе је обавезна за сва предузећа која послују у склопу ланца снабдевања у аутомобилској индустрији. Међународни стандард *IATF 16949:2016* прописује примену *FMEA* анализе у аутомобилској индустрији, док је њена методологија дефинисана у различитим упутствима и приручницима. Иако примена ове методе у већини индустрија није обавезна, она се веома често примењује и изван аутомобилске индустрије.

Упркос томе што је стандардна *FMEA* анализа, која се примењује у аутомобилској индустрији, веома корисна, у релевантној литератури се могу пронаћи радови у којима аутори сугеришу на многобројне недостатке ове методе, нарочито у методолошком смислу. Многи аутори су давали конкретне предлоге за унапређење постојећег *FMEA* приступа. Систематизација идентификованих недостатака *FMEA* анализе извршена је кроз публикације (*Liu* и др., 2013; *Liu*, 2016).

Неки од недостатака стандардне *FMEA* анализе превазиђени су кроз методолошке модификације дефинисане у најновијем *FMEA* приручнику за аутомобилску индустрију, објављеном 2019. године, под називом *AIAG&VDA FMEA Handbook* (*AIAG&VDA*, 2019). Управо, истраживања у овом раду делом се ослањају и на примену и унапређење новог приступа, што до сада у релевантној литератури није урађено.

Предмет истраживања у овом раду је сложен и обухвата: 1) унапређење конвенционалне *PFMEA* анализе кроз примену теорије фази скупова, метода вишеатрибутивног одлучивања (енгл. *Multi-Attribute Decision Making*, скр. *MADM*) и хеуристика, као и 2) примену метода вишеатрибутивног одлучивања за решавање других проблема који имају утицај на реализацију и поузданост процеса производње у предузећима аутомобилске индустрије. Предмет истраживања се може разложити на пет фаза које су у наставку објашњене.

У првој фази се врши развој модела за унапређење конвенционалне *PFMEA* анализе кроз примену теорије фази скупова и метода вишеатрибутивног одлучивања. Осим тога, у овој фази се врши проширење методе тако што се фактор ризика озбиљност последице разматра са три аспекта, а то су: 1) важност производа, 2) квалитет и 3) трошкови. Предложени модел је интегрисан са методологијом развијеном у најновијем *FMEA* приручнику.

Као и прва, тако се и друга фаза односи на развој модела заснованог на проширењу *PFMEA* анализе коришћењем теорије фази скупова и метода вишеатрибутивног одлучивања, с тим што се у моделу уводи нови фактор ризика, а то је озбиљност последице са аспекта трошкова и он се посматра као четврти фактор ризика. Одређивање приоритета начина отказа се врши применом предложеног вишеатрибутивног приступа.

У трећој и четвртој фази врши се примена метода вишеатрибутивног одлучивања за решавање осталих проблема који су у директној вези са процесом производње. У трећој фази предлаже се модел за оцену и избор добављача у аутомобилској индустрији, док се у четвртој фази предлаже модел за анализу фактора који утичу на безбедност и здравље запослених на радном месту.

Пета фаза се односи на развој модела за одређивање приоритета начина отказа применом метода оптимизације. У овом случају коришћене су две хеуристичке методе, а то су Генетски алгоритам и Метода променљивих околина. Предложени модел заснива се на проширењу стандардне *PFMEA* анализе увођењем два нова параметра: 1) трошкова одржавања и 2) трошковима застоја у производном процесу услед реализације начина отказа. Као важно ограничење, у проблем се уводи и буџет којим располаже *PFMEA* тим.

1.1 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Основни циљ ове докторске дисертације је модификација и унапређење конвенционалне *PFMEA* анализе, као и примена *IT2FMADM* метода и метахеуристика за решавање проблема који директно утичу на поузданост процеса производње у аутомобилској индустрији.

Разматрани циљ се може разложити на више подциљева, а то су:

- Идентификација потенцијалних начина отказа, њихових узрока и последица, који су представљени у виду *PFMEA* извештаја;
- Увођење нових фактора ризика и нових аспеката постојећих фактора ризика;
- Одређивање тежина разматраних фактора ризика и тежина њихових аспеката применом различитих метода;
- Примена процедуре из новог *FMEA* приручника за одређивање приоритета начина отказа;
- Примена *IT2FMADM* за одређивање приоритета начина отказа;
- Примена *IT2FMADM* за решавање осталих проблема који директно утичу на поузданост процеса производње;
- Одређивање редоследа, односно приоритета начина отказа, применом хеуристика;
- Тестирање предложених модела кроз студије случаја и анализа добијених резултата.

Може се рећи да реализација представљених подциљева доводи до реализације основног циља ове докторске дисертације.

1.2 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ИСТРАЖИВАЊА

Као што је већ напоменуто, примена *FMEA* анализе у аутомобилској индустрији прописана је међународним стандардом *IATF 16949:2016*. На овај начин је њена примена обавезна за све чланове ланца снабдевања у аутомобилској индустрији, чиме се истиче њен значај у пракси. Истовремено, примена и унапређење *FMEA* анализе, тема су бројних научних истраживања. У релевантној литератури препозната је важност ове методе, али и недостаци који могу имати негативан утицај на њену поузданост и применљивост. Стога, у овој докторској дисертацији, посебна пажња усмерена је на проналажење могућности за побољшање конвенционалне *FMEA* анализе, тј. њене верзије дефинисане за примену у процесу производње (*PFMEA*).

Нови *FMEA* приручник, под називом *AIAG&VDA FMEA Handbook (AIAG&VDA, 2019)*, прописује нови поступак за одређивање приоритета начина отказа. У овој докторској дисертацији, извршена је модификација и унапређење традиционалног *FMEA* приступа, али и приступа дефинисаног у новом приручнику, што до сада није извршено у релевантној литератури.

Два важна практична проблема, односно избор добављача и безбедност и здравље запослених на радном месту, имају директан утицај на поузданост процеса производње. Применом *IT2FMADM* метода дефинисани су нови приступи за решавање ових проблема.

Редослед третирања начина отказа, односно смањења или елиминисања утицаја узрока који доводе до њихове појаве, може се поставити као оптимизациони задатак. У овом случају, решење оптимизације добија се применом хеуристичких метода.

1.3 ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ

Основне хипотезе од којих се полази у овој докторској дисертацији су:

- Хипотеза 1: Процена озбиљности последица са респектовањем више аспеката као и коришћењем теорије фази скупова и правила фази алгебре значајно могу да повећају поузданост резултата *PFMEA* анализе у аутомобилској индустрији.
- Хипотеза 2: Редослед елиминисања грешака може да се постави као оптимизациони задатак и решење се налази применом метахеуристичких метода; на овај начин конкурентност аутомобилске компаније, током дужег временског периода, може да се оствари.

Треба нагласити да је уместо термина „грешка”, у овој докторској дисертацији, коришћен термин „отказ” или чешће „начин отказа”. Иако термин „грешка” није погрешан, термини „отказ” или „начин отказа” ближи су *FMEA* терминологији и заступљенији су у домаћој релевантној литератури.

1.4 МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

За потребе истраживања која су реализована у оквиру ове докторске дисертације, коришћене су различите методе:

- Метод интервјуа, анкете, *PFMEA* извештаји и подаци из евиденције коришћени су за добијање улазних података;
- За моделовање неизвесних и непрецизних променљивих које егзистирају у разматраним проблемима примењена је теорија фази скупова;
- Одређивање вредности непрецизних променљивих заснива се на правилима фази алгебре и математичке статистике;
- Различите *IT2FMADM* методе коришћене су за решавање разматраних проблема;
- Хеуристике су примењене за одређивање приоритета начина отказа.

У спроведеним истраживањима коришћене су различите модификације, као и различити приступи интеграције наведених метода.

1.5 ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Као основни допринос истраживања реализованих у овој докторској дисертацији може се означити унапређење процеса производње у аутомобилској индустрији, односно повећање његове поузданости, кроз модификацију и примену *PFMEA* анализе и различитих метода оптимизације. Овај допринос ће бити остварен кроз развој пет модела, кроз чију примену се очекује остварење следећих резултата:

- Проширење конвенционалне *PFMEA* анализе, увођењем нових фактора ризика и њихових аспеката;
- Респектовање различитих тежина фактора ризика и њихових аспеката;

- Унапређење тачности и поузданости примене *PFMEA* анализе применом теорије фази скупова за описивање неизвесних и непрецизних вредности;
- Прецизније и поузданије одређивање приоритета начина отказа применом *IT2FMADM* метода;
- Развој поузданог модела за оцену и избор добављача у аутомобилској индустрији, који је заснован на примени хибридног *IT2FMADM* приступа;
- Развој модела за анализу фактора који утичу на безбедност и здравље запослених на радном месту у аутомобилској индустрији, који је тестиран кроз примену две *IT2FMADM* методе;
- Примена хеуристика за одређивање приоритета начина отказа, чиме се дефинише нови приступ за решавање овог проблема.

Доприноси предложених модела тестирани су на пет студија случаја, чиме је проверен и њихов практичан допринос.

1.6 ОКВИРНИ САДРЖАЈ РАДА

Ова докторска дисертација конципирана је тако да садржи шест поглавља, која су представљена следећим редоследом:

1. Увод – У првом поглављу, превасходно је представљен домен, а затим и предмет истраживања. Након тога, дати су најважнији циљеви истраживања, као и основне хипотезе од којих истраживање започиње. Наведене су основне методе које се користе у планираним истраживањима и описани су очекивани резултати. На крају поглавља је дат оквирни садржај дисертације.

2. Основна теоријска разматрања о фази скуповима, *FMEA* анализи и методама вишеатрибутивног одлучивања – У оквиру овог поглавља су дате теоријске основе коришћених метода и приступа. Осим тога, ово поглавље садржи и преглед литературних извора у којима су коришћене *IT2FMADM* методе примењене и у овој дисертацији, као и преглед литературе у домену *FMEA* анализе.

3. Основна теоријска разматрања о примењеним оптимizacionим методама – Поглавље садржи теоријске основе и приказ различитих приступа у класификацији оптимizacionих метода. Као методе које су коришћене у овој докторској дисертацији, посебно су описане две хеуристике, односно Генетски алгоритам и Метода променљивих околина.

4. Предложени модели за унапређење процеса производње применом модификоване *PFMEA* анализе и метода оптимизације – Четврто поглавље се састоји од 5 потпоглавља. У сваком потпоглављу представљен је један од предложених модела. Потпоглавља приказују начин моделовања неизвесних и непрецизних вредности које егзистирају у разматраном проблему. Осим тога, свако потпоглавље даје приказ и објашњење предложеног алгоритма решавања проблема.

5. Студије случаја – Пето поглавље се састоји из пет потпоглавља, односно пет студија случаја. Студије случаја приказане у потпоглављима 5.1 – 5.5 реализоване су на основу модела дефинисаних у оквиру потпоглавља 4.1 – 4.5. Редни број потпоглавља предложеног модела (поглавље 4) одговара редном броју потпоглавља студије случаја (поглавље 5).

Студије случаја су реализоване на подацима добијеним из четири различита предузећа аутомобилске индустрије. Прва и друга студија случаја реализоване су на подацима добијеним из предузећа које је добављач првог реда у ланцу снабдевања. Разматрано предузеће се бави производњом текстилних компонената ентеријера аутомобила. Трећа студија случаја реализована је у предузећу које је оригинални произвођач опреме (енгл. *Original Equipment Manufacturer*, скр. *OEM*) у ланцу снабдевања у аутомобилској индустрији. Четврта студија случаја реализована је у предузећу које је добављач првог реда у ланцу снабдевања, а основна делатност овог предузећа је производња гумених делова и компонената које се уграђују у моторна возила различите врсте и намене. За реализацију пете студије случаја коришћени су подаци који потичу из три предузећа која су добављачи првог реда у ланцу снабдевања. Осим из два предузећа која су претходно наведена, подаци коришћени у овој студији случаја потичу и из предузећа чија је основна делатност развој и производња система ожичења за аутомобилску индустрију.

6. Закључак – У последњем поглављу извршена је анализа развијених модела и рекапитулација реализованих студија случаја. Осим тога, извршено је поређење добијених резултата са уводним претпоставкама, односно хипотезама. На крају поглавља су истакнути главни доприноси и ограничења предложених модела, као и правци будућих истраживања.

Списак коришћених литературних извора дат је у посебном поглављу. Коришћене референце су сортиране и представљене абecedним редом. Као последње поглавље дисертације дат је Прилог у коме су приказани улазни подаци, коришћени у студији случаја приказаној у потпоглављу 5.5.

2. ОСНОВНА ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА О ФАЗИ СКУПОВИМА, FMEA АНАЛИЗИ И МЕТОДАМА ВИШЕАТРИБУТИВНОГ ОДЛУЧИВАЊА

Ово поглавље је подељено у шест већих целина. У првој, анализиране су карактеристике и предности примене теорије фази скупова у моделовању различитих врста неизвесности и непрецизности. У другој целини дата су основна теоријска разматрања о FMEA анализи. Решавање проблема применом метода вишеатрибутивног одлучивања и њихове основне карактеристике представљене су у трећем делу овог поглавља. У четвртном делу поглавља представљен је домен примене и неке од методолошких модификација FMEA анализе. Пети део поглавља се односи на проширење MADM метода применом фази приступа, док су у шестом делу приказана досадашња истраживања у области комбиновања FMEA анализе и MADM метода.

2.1 ФАЗИ ЛОГИКА И ТЕОРИЈА ФАЗИ СКУПОВА

Творцем фази логике и теорије фази скупова сматра се *Lotfi A. Zadeh*, електроинжењер, математичар и експерт у области вештачке интелигенције. Појмови фази логика и фази скупови први пут су представљени научној заједници у раду (*Zadeh, 1965*), где је *Zadeh* представио свој нови концепт. *Zadeh (2015)* наводи да његова идеја није одмах озбиљно схваћена и прихваћена у научним круговима. Данас, након више од педесет година од настанка концепта, фази логика се примењује у многим областима науке и технике. Научна примена фази логике и теорије фази скупова најчешће се односи на примену овог концепта у вештачкој интелигенцији (*Pannu, 2015*) и у решавању проблема вишекритеријумског одлучивања (*Stojčić, 2019*). У техници је фази логика пронашла примену у функционисању уређаја различитих намена, попут веш машина, камера, микроталасних пећница, судомашина, као и различитих типова робота и других уређаја (*Kaur и Bharti, 2012; Carter, 2021*).

У даљем тексту концептуално је објашњен принцип фази логике, представљени су основни фази скупови или фази скупови типа-1 (енгл. *Type-1 Fuzzy Set(s)*, скр. *FS(s)*), док је посебна пажња усмерена на фази скупове типа-2 (енгл. *Type-2 Fuzzy Set(s)*, скр. *T2FS(s)*), који су и коришћени у истраживањима у оквиру ове дисертације.

2.1.1 Концепт фази логике и фази скупова

Једна од парадигматских промена у науци и математици која се десила у XX веку односи се на концепт неизвесности. У традиционалном смислу, наука треба да тежи извесности, прецизности, тачности, оштрини и конзистентности. Последњих деценија, концепт неизвесности се сматра неопходним и веома корисним за решавање савремених научно-истраживачких проблема (*Klir и Yuan, 1995*). Како би се објаснио појам фази логике и фази скупова, потребно је уочити разлику између класичних (*crisp*) и фази скупова. Теорија класичних скупова се заснива на бинарном систему припадности неког елемента x скупу A . Дакле, неки елемент x може да припада или да не припада скупу A , што се математички може представити на следећи начин (*Mendel, 2017*):

$$A \Rightarrow \mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{ако } x \in A \\ 0 & \text{ако } x \notin A \end{cases}$$

где је скуп A (који се такође може посматрати као подскуп универзалног скупа X) математички еквивалент његовој функцији припадности $\mu_A(x)$, у смислу да је познавање $\mu_A(x)$ истовремено познавање самог A .

Стога, у случају класичних скупова, неко тврђење може да буде тачно или нетачно, односно припадност неког елемента x скупу A може да се опише са 0 (не припада) и 1 (припада). За разлику од класичних скупова, фази скупове карактерише вредност функције припадности која може да буде било која вредност на интервалу $[0,1]$ (Zadeh, 1965; Mendel, 2017), а основни облик фази скупа \tilde{A} се може математички представити на следећи начин:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\}, 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1$$

У претходном изразу фази скуп \tilde{A} је скуп функција у универзалном скупу X , ограничен могућношћу да припада $\mu_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0,1]$ (Aisbett, Rickard и Morgenthaler, 2010; Mendel, 2017). У новијој литератури, термин фази скупови се користи као заједнички назив за све типове фази скупова Mendel (2017).

Специјалан облик фази скупова су фази скупови дефинисани на скупу реалних бројева \mathbb{R} и називају се фази бројевима. Функција припадности фази броја треба да задовољи следећи услов (Klir и Yuan, 1995):

$$\tilde{A}: \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$$

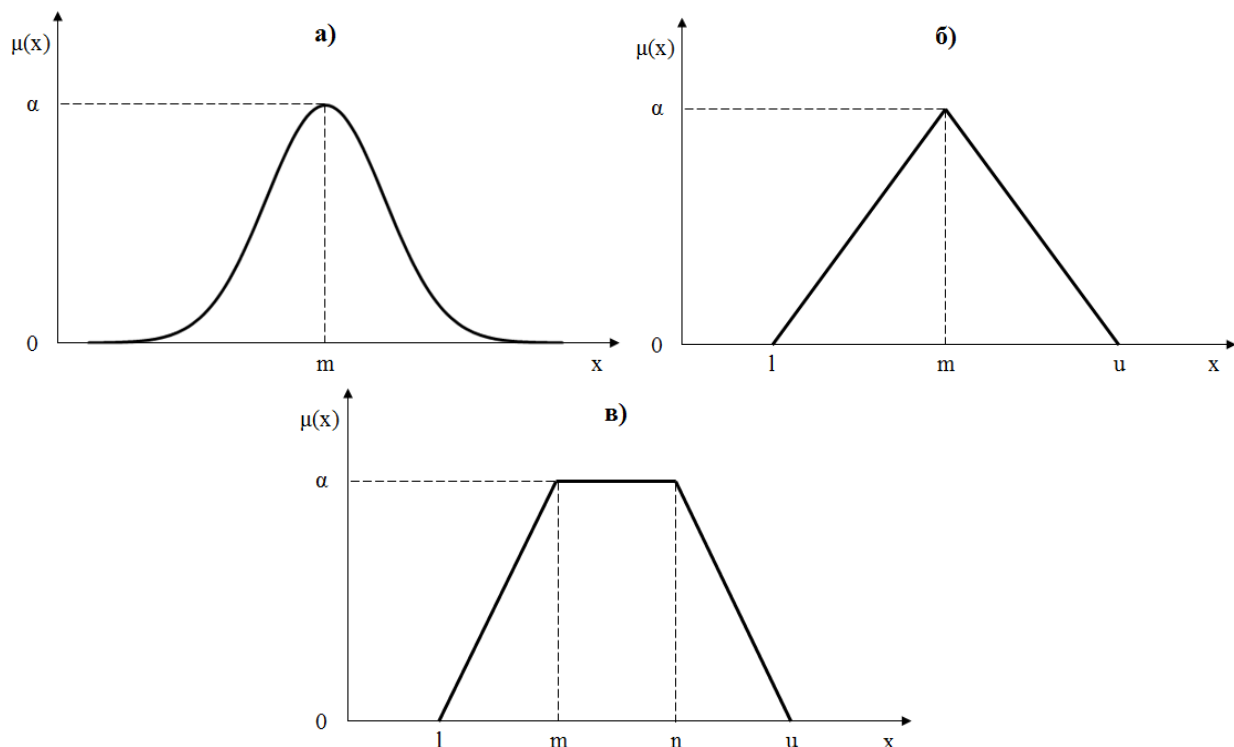
Фази скуп \tilde{A} на скупу реалних бројева \mathbb{R} сматра се фази бројем ако и само ако (Klir и Yuan, 1995; Hanss, 2005; Mendel (2017):

- 1) је нормалан, односно да постоји елемент x_0 такав да $\mu_{\tilde{A}}(x_0) = 1$,
- 2) је конвексан, односно да:

$$\mu_{\tilde{A}}(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \mu_{\tilde{A}}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}}(x_2) \forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}, \forall \lambda \in [0,1]$$
- 3) постоји тачно једно $x \in \mathbb{R}$ са $\mu_{\tilde{A}} = 1$ и
- 4) функција припадности $\mu_{\tilde{A}}(x), x \in \mathbb{R}$ је макар по деловима непрекидна.

Још један појам се директно везује за фази скупове, а то је „рачунање речима” или „рачунање помоћу речи” (енгл. *Computing with Words*, скр. *CW*) (Zadeh, 1973). Када се говори о класичним математичким прорачунима, искључиво се користе бројеви и симболи. Насупрот томе, људи једноставније користе речи како би доносили закључке и исказивали своја мишљења и процене. Како речи природног језика често имају нејасне ознаке, оне се на адекватан начин могу моделовати фази скуповима (Zadeh, 1973; Zadeh, 1999). Код *CW* приступа, фази скупови се перципирају као лингвистичке грануле или лингвистички искази. Тада се одговарајуће функције припадности додељују одговарајућим речима или лингвистичким исказима (Pedrycz и Vukovich, 2002). Лингвистички искази могу да буду једноставног, али и сложеног облика (Zadeh, 1999). На пример, једноставан облик може да буде у виду једне рече „висок”, „хладан”, „тешко” и сл. С друге стране, сложени облик лингвистичког исказа може да гласи „веома топло”, „не превише тешко”, „готово без промена” и сл.

Различити облици функције припадности FS приказани су на слици 2.1: а) облик Гаусове криве, б) троугаони и в) трапезоидни облик.



Слика 2.1 – Различити облици функције припадности за фази скупове типа-1: а) облик Гаусове криве, б) троугаони и в) трапезоидни облик (прилагођено из (Azam и др., 2020; Khairuddin и др., 2021))

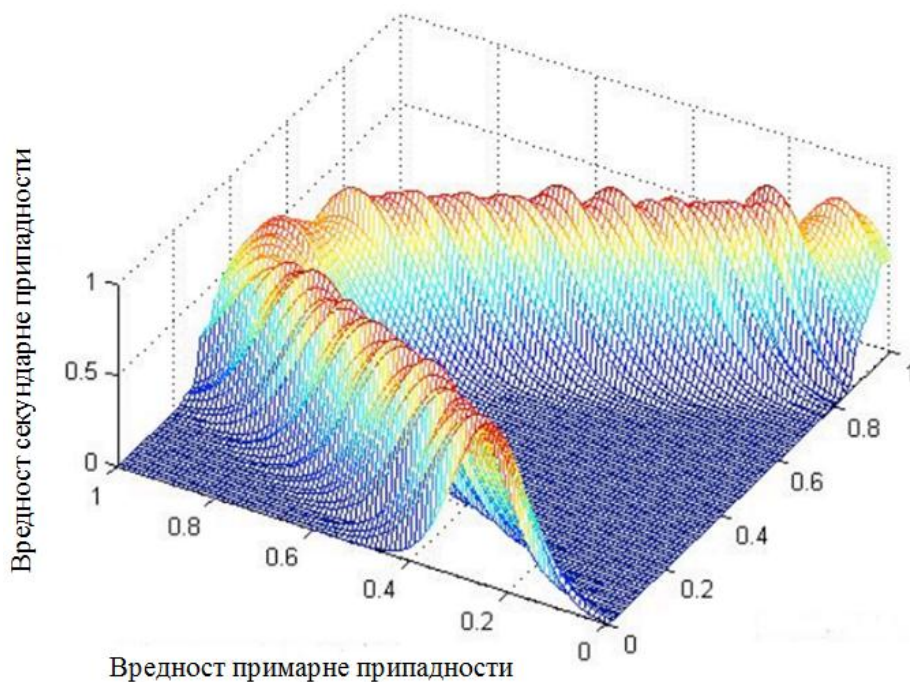
Модална или централна вредност FS , приказана на слици 2.1.а и 2.1.б, означена је са m . Ова вредност означава случај када вредност функције припадности неког елемента x фази скупу \tilde{A} достигне максималну вредност. Са l и u означене су доња и горња граница FS , респективно. Доња и горња граница означавају да је вредност функције припадности неког елемента x фази скупу \tilde{A} једнака 0, $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0$. Код трапезоидних фази скупова (слика 2.1.в), модалне вредности означене су са m и n (Bakar, Mohamad и Sulaiman, 2012; Khairuddin и др., 2021). Због своје линеарности и једноставне примене, у литератури се најчешће користе троугаони и трапезоидни FS s. Ова два облика функције припадности описана су са три и четири граничне вредности, респективно. Код троугаоног фази скупа (енгл. *Triangular Fuzzy Set(s)*, скр. *TFS(s)*) степен припадности елемента x фази скупу \tilde{A} има тенденцију раста од l до m , у тачки m достиже максималну вредности која је једнака 1, а затим има тенденцију опадања од m до u . Код трапезоидног облика функције припадности (енгл. *Trapezoidal Fuzzy Set(s)*, скр. *TrFS(s)*), степен припадности елемента x фази скупу \tilde{A} има тенденцију раста од l до m , затим од m до n бива непромењена (достигне максимум), да би од m до u имала тенденцију опадања (Mocq, St-Hilaire и Cunjak, 2013).

У литератури могу да се нађу радови у којима је моделовање неизвесности и непрецизности засновано на примени различитих типова фази скупова, као што су (Bustince, 2015): фази скупови типа-2, интуитивни фази скупови (енгл. *Intuitionistic Fuzzy Set(s)*, скр. *IFS(s)*), Питагорини фази скупови (енгл. *Pythagorean Fuzzy Set(s)*, скр. *PFS(s)*), неутрософски фази скупови (енгл. *Neutrosophic Fuzzy Set(s)*, скр. *NFS(s)*), фази груби скупови (енгл. *Fuzzy Rough Set(s)*, скр. *FRS(s)*) и др. У овој дисертацији за моделовање неизвесних и непрецизних величина коришћени су интервални фази скупови типа-2 (енгл. *Interval Type-2 Fuzzy Set(s)*, скр. *IT2FS(s)*), чије су теоријске основе представљене у наредној секцији.

2.1.2 Фази скупови типа-2

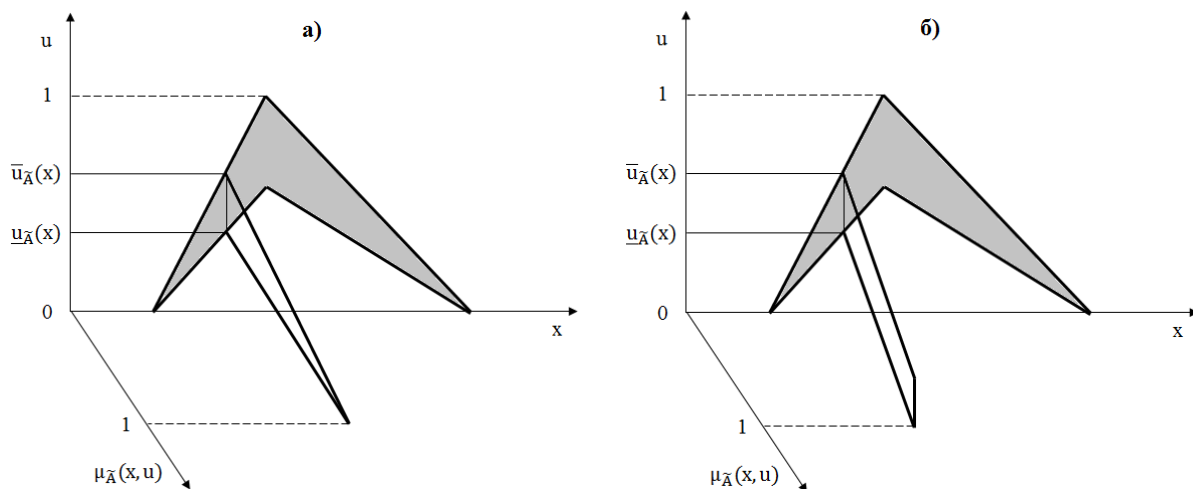
Концепт $T2FSs$ (Zadeh, 1975) настао је пре више од четрдесет година и данас представља један од често коришћених математичких алата за моделовање неизвесности. Ова врста фази скупова нашла је примену, како у истраживањима у области индустрије (Dereli и др., 2011), тако и у истраживањима у другим научним пољима (Celik и др., 2015). Овај тип фази скупова настао је као проширење FSs (Karnik и Mendel, 2001). Као што је већ објашњено у овом поглављу, FSs настали су из потребе да се опише припадност неког елемента x скупу A , када је немогуће утврдити да ли је вредност функције припадности 0 или 1, већ се она налази на интервалу $[0,1]$. Исто тако, када су околности у тој мери неизвесне да је функцију припадности неког елемента x фази скупу \tilde{A} немогуће описати *crisp* вредношћу на интервалу $[0,1]$, користе се $T2FSs$ (Mendel, 2017).

С обзиром на то да примена општих фази скупова типа-2 (енгл. *General Type-2 Fuzzy Set(s)*, скр. $GT2FS(s)$) захтева веома комплексне прорачуне, у литератури се најчешће користи њихов посебан облик, а то су $IT2FSs$ (Mendel, John и Liu, 2006; Kahraman и др., 2014). За разлику од FSs , код којих је карактеристична појава да је вредност степена припадности неког елемента увек вредност на интервалу $[0,1]$, код $T2FSs$ припадност фази скупу се представља као интервал, а не само као једна вредност (Wu, 2010). На слици 2.2 дат је 3D приказ $GT2FSs$.



Слика 2.2 – 3D приказ $GT2FSs$ облика Гаусове криве (Mendel, 2012)

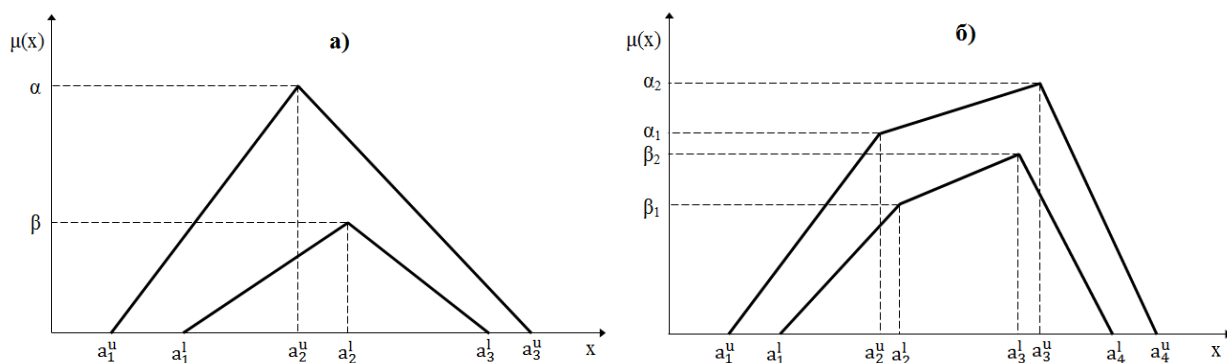
Основна разлика између $GT2FSs$ и $IT2FSs$ графички је приказана на слици 2.3. Са леве стране, односно сликом 2.3.а приказан је $GT2FSs$ са троугаоним обликом секундарне функције припадности, док је сликом 2.3.б, која је приказана десно, дат основни облик $IT2FSs$.



Слика 2.3 – Разлика између $GT2FSs$ (а) и $IT2FSs$ (б) (прилагођено из (Jianzhong и др., 2019))

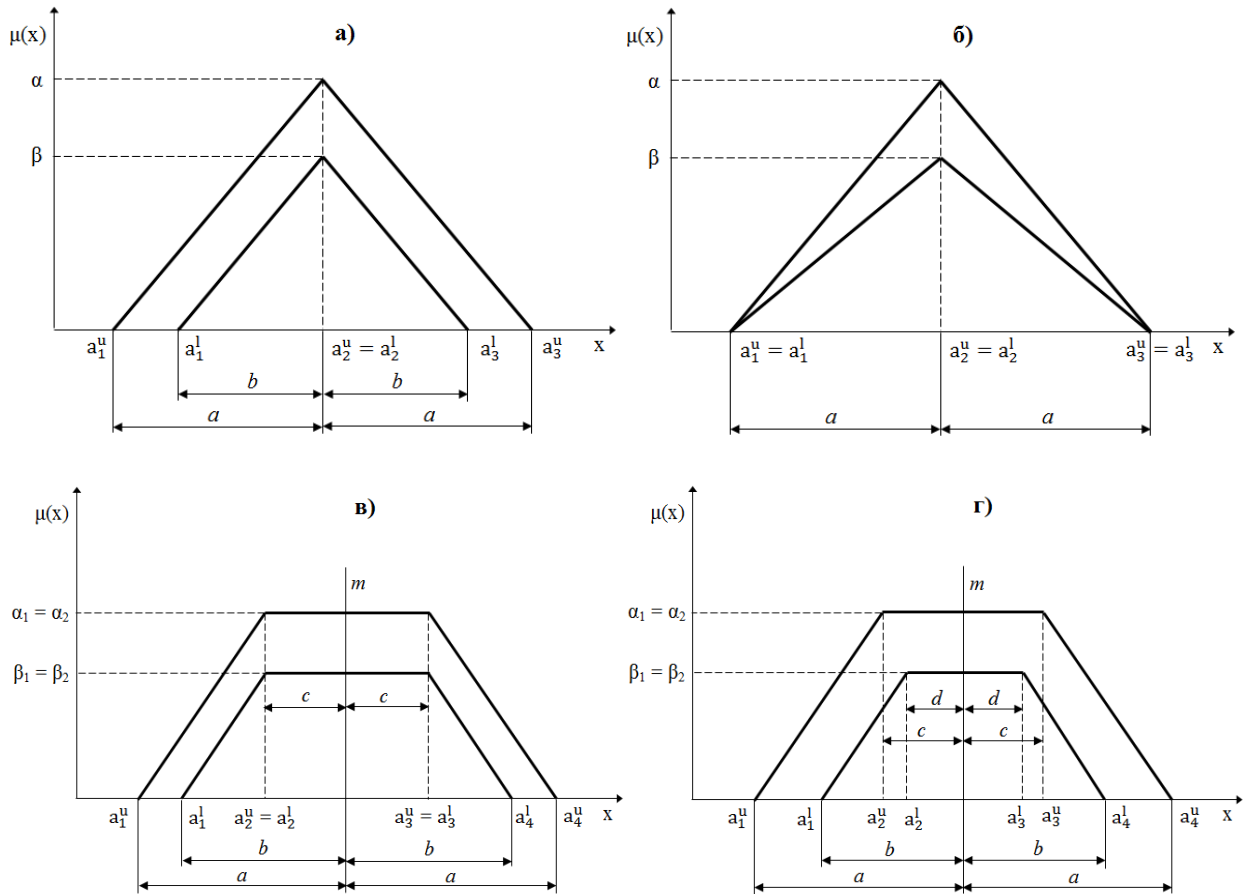
Примарна припадност $IT2FSs$ (слика 2.3.б) је ограничена горњом и доњом функцијом припадности, које су у својој основи FSs (Mendel, 2007). На слици 2.3.б приказане су тачке на горњој и доњој функцији припадности које су обележене са $\bar{u}_{\bar{A}}(x)$ и $\underline{u}_{\bar{A}}(x)$, респективно. Заправо, ове тачке се називају горњом, $\bar{u}_{\bar{A}}(x)$ и доњом, $\underline{u}_{\bar{A}}(x)$ границом примарне припадности. Регион ограничен овим двама тачкама назива се отисак неизвесности и представља унију примарне припадности (Mendel, John и Liu, 2006; Jianzhong и др., 2019).

На слици 2.4 дат је приказ $IT2FSs$. У литератури се најчешће користе троугаони интервални фази скупови типа-2 (енгл. *Interval Type-2 Triangular Fuzzy Set(s)*, скр. $IT2TFS(s)$) и трапезоидни интервални фази скупови типа-2 (енгл. *Interval Type-2 Trapezoidal Fuzzy Set(s)*, скр. $IT2TrFS(s)$).



Слика 2.4 – $IT2TFSs$ (а) и $IT2TrFSs$ (б) (прилагођено из (Yazici и Kahraman, 2015; Zhong, Yang и Wu, 2017; Komatina и др., 2022a))

У циљу смањења комплексности прорачуна, многи аутори сугеришу да је адекватно да се користе $IT2FSs$ са симетричним функцијама припадности (Mendel и Wu, 2006; Li, 2013), као што је и приказано на слици 2.5.



Слика 2.5 – Поједини примери симетричних $IT2FSs$: $IT2TFSS$ (а, б) и $IT2TrFSs$ (в, г) (прилагођено из (Mendel и Wu, 2006; Li, 2013; Komatina и др., 2021))

Карактеристично за симетричне $IT2FSs$, као што се и може видети на слици 2.5, је то да се горње и доње границе фази скупа (a и b), као и модалне вредности (код трапезоидног облика (c и d)), налазе на истој удаљености од линије која означава средину фази скупа, m . Осим тога, за трапезоидни облик функције припадности карактеристично је да $\alpha_1 = \alpha_2$ и $\beta_1 = \beta_2$ (Li, 2013).

Основне дефиниције о $IT2FSs$

Дефиниције о $GT2FSs$ и $IT2FSs$ дате су у (Mendel, John и Liu, 2006). Надаље су представљене дефиниције преузете из (Chen и Lee, 2010), где су аутори дефиниције преузели и прилагодили из наведеног рада. Дефиниције се могу представити на следећи начин (Mendel, John и Liu, 2006; Chen и Lee, 2010):

Дефиниција 1. Фази скуп типа-2, означен као \tilde{A} , у универзалном скупу X , може да буде представљен тип-2 функцијом припадности $\mu_{\tilde{A}}$ на следећи начин (Mendel, John и Liu, 2006):

$$\tilde{A} = \left\{ \left((x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \right) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1], 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1 \right\},$$

где J_x означава интервал $[0, 1]$. Штавише, фази скуп типа-2 означен као \tilde{A} може да се представи и на следећи начин (Mendel, John и Liu, 2006):

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u)/(x, u),$$

где $J_x \subseteq [0,1]$ и $\int \int$ означава унију на свим прихватљивим x и u .

Дефиниција 2. Нека је \tilde{A} фази скуп типа-2 у универзалном скупу X , представљен функцијом припадности $\mu_{\tilde{A}}$. Ако свако $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1$, тада се \tilde{A} назива интервални фази скуп типа-2. Интервални фази скуп типа-2, \tilde{A} , може се сматрати специјалним случајем фази скупа типа-2, који се представља на следећи начин (*Mendel, John и Liu, 2006*):

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1/(x, u), J_x \subseteq [0,1].$$

Дефиниција 3. Горња функција припадности и доња функција припадности трапезоидног облика интервалног фази скупа типа-2 су фази скупови типа-1, респективно (*Chen и Lee, 2010; Đurić и др., 2019*):

$$\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) = \left((a_1^u, a_2^u, a_3^u, a_4^u; \alpha_1, \alpha_2), (a_1^l, a_2^l, a_3^l, a_4^l; \beta_1, \beta_2) \right),$$

где \tilde{A}^U и \tilde{A}^L су фази скупови типа-1, $a_1^u, a_2^u, a_3^u, a_4^u, a_1^l, a_2^l, a_3^l$ и a_4^l су референтне тачке интервалног тип-2 фази скупа \tilde{A} , α_i означава вредност припадности елемента $a_{(i+1)}^u$ горњој трапезоидној функцији припадности \tilde{A}^U , $1 \leq i \leq 2$, док β_i означава вредност припадности елемента $a_{(i+1)}^l$ доњој трапезоидној функцији припадности \tilde{A}^L , $1 \leq i \leq 2$.

Важе услови да:

$$\alpha_1 \in [0,1]; \alpha_2 \in [0,1]; \beta_1 \in [0,1] \text{ и } \beta_2 \in [0,1]$$

Дефиниција 4. Уколико је X скуп реалних бројева, тада се фази скуп типа-2 и интервални фази скуп типа-2 у скупу X називају фази број типа-2 (енгл. *Type-2 Fuzzy Number(s)*, скр. *T2FN(s)*) и интервални фази број типа-2 (енгл. *Interval Type-2 Fuzzy Number(s)*, скр. *IT2FN(s)*), респективно (*Mendel, John и Liu, 2006*).

Основне рачунске операције се *IT2FNs*

Дефиниција 5. Уколико су горња и доња функција припадности *IT2FN* троугаоног облика, тада се фази број \tilde{A} у скупу реалних бројева X назива троугаони интервални фази број типа-2 (енгл. *Interval Type-2 Triangular Fuzzy Number(s)*, скр. *IT2TFN(s)*). Уколико су горња и доња функција припадности *IT2FN* трапезоидног облика, тада се фази број \tilde{A} у скупу реалних бројева X назива трапезоидни интервални фази број типа-2 (енгл. *Interval Type-2 Trapezoidal Fuzzy Number(s)*, скр. *IT2TrFN(s)*) (*Mendel, John и Liu, 2006; Chen и Lee, 2010; Đurić и др., 2019*).

Нека су дата два *IT2TrFNs*, \tilde{A} и \tilde{B} :

$$\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) = \left((a_1^u, a_2^u, a_3^u, a_4^u; \alpha_1(\tilde{A}^U), \alpha_2(\tilde{A}^U)), (a_1^l, a_2^l, a_3^l, a_4^l; \beta_1(\tilde{A}^L), \beta_2(\tilde{A}^L)) \right)$$

$$\tilde{B} = (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L) = \left((b_1^u, b_2^u, b_3^u, b_4^u; \alpha_1(\tilde{B}^U), \alpha_2(\tilde{B}^U)), (b_1^l, b_2^l, b_3^l, b_4^l; \beta_1(\tilde{B}^L), \beta_2(\tilde{B}^L)) \right)$$

Надаље су дате основне математичке операције са $IT2TrFNs$ које су дефинисане у (Lee и Chen, 2008; Chen и Lee, 2010).

Дефиниција 6. Збир два $IT2TrFNs$ се може одредити на следећи начин (Lee и Chen, 2008; Chen и Lee, 2010; Kahraman и др., 2014):

$$\begin{aligned} \tilde{A} \oplus \tilde{B} &= (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) \oplus (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L) \\ &= \left(\left(a_1^u + b_1^u, a_2^u + b_2^u, a_3^u + b_3^u, a_4^u + b_4^u; \min(\alpha_1(\tilde{A}^U), \alpha_1(\tilde{B}^U)), \min(\alpha_2(\tilde{A}^U), \alpha_2(\tilde{B}^U)) \right) \right) \\ &\quad \left(a_1^l + b_1^l, a_2^l + b_2^l, a_3^l + b_3^l, a_4^l + b_4^l; \min(\beta_1(\tilde{A}^L), \beta_1(\tilde{B}^L)), \min(\beta_2(\tilde{A}^L), \beta_2(\tilde{B}^L)) \right) \end{aligned}$$

Дефиниција 7. Разлика два $IT2TrFNs$, $\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L)$ и $\tilde{B} = (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L)$ одређује се на следећи начин (Lee и Chen, 2008; Chen и Lee, 2010; Kahraman и др., 2014):

$$\begin{aligned} \tilde{A} \ominus \tilde{B} &= (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) \ominus (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L) \\ &= \left(\left(a_1^u - b_4^u, a_2^u - b_3^u, a_3^u - b_2^u, a_4^u - b_1^u; \min(\alpha_1(\tilde{A}^U), \alpha_1(\tilde{B}^U)), \min(\alpha_2(\tilde{A}^U), \alpha_2(\tilde{B}^U)) \right) \right) \\ &\quad \left(a_1^l - b_4^l, a_2^l - b_3^l, a_3^l - b_2^l, a_4^l - b_1^l; \min(\beta_1(\tilde{A}^L), \beta_1(\tilde{B}^L)), \min(\beta_2(\tilde{A}^L), \beta_2(\tilde{B}^L)) \right) \end{aligned}$$

Дефиниција 8. Производ два $IT2TrFNs$, $\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L)$ и $\tilde{B} = (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L)$ одређује се на следећи начин (Lee и Chen, 2008; Chen и Lee, 2010; Kahraman и др., 2014):

$$\begin{aligned} \tilde{A} \otimes \tilde{B} &= (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) \otimes (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L) \\ &= \left(\left(a_1^u \times b_1^u, a_2^u \times b_2^u, a_3^u \times b_3^u, a_4^u \times b_4^u; \min(\alpha_1(\tilde{A}^U), \alpha_1(\tilde{B}^U)), \min(\alpha_2(\tilde{A}^U), \alpha_2(\tilde{B}^U)) \right) \right) \\ &\quad \left(a_1^l \times b_1^l, a_2^l \times b_2^l, a_3^l \times b_3^l, a_4^l \times b_4^l; \min(\beta_1(\tilde{A}^L), \beta_1(\tilde{B}^L)), \min(\beta_2(\tilde{A}^L), \beta_2(\tilde{B}^L)) \right) \end{aligned}$$

Дефиниција 9. Операција дељења два $IT2TrFNs$, $\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L)$ и $\tilde{B} = (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L)$ врши се на следећи начин (Chen, 2014; Đurić и др., 2019):

$$\begin{aligned} \tilde{A} \div \tilde{B} &= (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) \div (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L) \\ &= \left(\left(\frac{a_1^u}{b_4^u}, \frac{a_2^u}{b_3^u}, \frac{a_3^u}{b_2^u}, \frac{a_4^u}{b_1^u}; \min(\alpha_1(\tilde{A}^U), \alpha_1(\tilde{B}^U)), \min(\alpha_2(\tilde{A}^U), \alpha_2(\tilde{B}^U)) \right) \right) \\ &\quad \left(\frac{a_1^l}{b_4^l}, \frac{a_2^l}{b_3^l}, \frac{a_3^l}{b_2^l}, \frac{a_4^l}{b_1^l}; \min(\beta_1(\tilde{A}^L), \beta_1(\tilde{B}^L)), \min(\beta_2(\tilde{A}^L), \beta_2(\tilde{B}^L)) \right) \end{aligned}$$

Дефиниција 10. Производ $IT2TrFN$, \tilde{A} и *crisp* броја, q , одређује се на следећи начин (Lee и Chen, 2008; Chen и Lee, 2010; Kahraman и др., 2014):

$$\begin{aligned} q \cdot \tilde{A} &= \tilde{A} \cdot q \\ &= \left((q \cdot a_1^u, q \cdot a_2^u, q \cdot a_3^u, q \cdot a_4^u; \alpha_1, \alpha_2), (q \cdot a_1^l, q \cdot a_2^l, q \cdot a_3^l, q \cdot a_4^l; \beta_1, \beta_2) \right) \end{aligned}$$

Дефиниција 11. Количник $IT2TrFN$, \tilde{A} и позитивног *crisp* броја q , $q > 0$, одређује се на следећи начин (Lee и Chen, 2008; Chen и Lee, 2010; Kahraman и др., 2014):

$$\frac{\tilde{A}}{q} = \left(\left(\frac{a_1^u}{q}, \frac{a_2^u}{q}, \frac{a_3^u}{q}, \frac{a_4^u}{q}; \alpha_1, \alpha_2 \right), \left(\frac{a_1^l}{q}, \frac{a_2^l}{q}, \frac{a_3^l}{q}, \frac{a_4^l}{q}; \beta_1, \beta_2 \right) \right)$$

Дефиниција 12. Количник $IT2TrFN$, \tilde{A} и негативног *crisp* броја q , $q < 0$, одређује се на следећи начин (Chen, 2014):

$$\frac{\tilde{A}}{q} = \left(\left(\frac{a_4^u}{q}, \frac{a_3^u}{q}, \frac{a_2^u}{q}, \frac{a_1^u}{q}; \alpha_1, \alpha_2 \right), \left(\frac{a_4^l}{q}, \frac{a_3^l}{q}, \frac{a_2^l}{q}, \frac{a_1^l}{q}; \beta_1, \beta_2 \right) \right)$$

Дефиниција 13. Реципрочна вредност $IT2TrFN$, \tilde{A} одређује се на следећи начин (Sadi-Nezhad и Damghani, 2010; Đurić и др., 2019):

$$\left(\tilde{A} \right)^{-1} = \left(\left(\frac{1}{a_4^u}, \frac{1}{a_3^u}, \frac{1}{a_2^u}, \frac{1}{a_1^u}; \alpha_1, \alpha_2 \right), \left(\frac{1}{a_4^l}, \frac{1}{a_3^l}, \frac{1}{a_2^l}, \frac{1}{a_1^l}; \beta_1, \beta_2 \right) \right)$$

Неки од поступака дефазификације $IT2FNs$

Дефиниција 14. Дефазификација је процедура којом се фази скуп, односно фази број, трансформише у *crisp* вредност (Wang, 2001; Amini и Nikraz, 2016). Постоји више поступака дефазификације развијених за $IT2FNs$, од којих су неки надаље приказани.

Дефиниција 15. Нека је \tilde{A} фази број моделован као:

- $IT2TFN$ и може се представити на следећи начин:

$$\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) = \left((a_1^u, a_2^u, a_3^u; \alpha), (a_1^l, a_2^l, a_3^l; \beta) \right)$$

- $IT2TrFN$ и може се представити на следећи начин:

$$\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) = \left((a_1^u, a_2^u, a_3^u, a_4^u; \alpha_1, \alpha_2), (a_1^l, a_2^l, a_3^l, a_4^l; \beta_1, \beta_2) \right),$$

а) У раду (Kahraman и др., 2014) развијен је поступак дефазификације за $IT2TFN$ и $IT2TrFN$, док су дефазификоване вредности означене са $DTriT$ и $DTraT$, респективно:

$$DTriT = \frac{\frac{(a_3^u - a_1^u) + (a_2^u - a_1^u)}{3} + a_1^u + \alpha \left[\frac{(a_3^l - a_1^l) + (a_2^l - a_1^l)}{3} + a_1^l \right]}{2}$$

$$DTraT =$$

$$= \frac{\frac{(a_4^u - a_1^u) + (\alpha_1 \cdot a_2^u - a_1^u) + (\alpha_2 \cdot a_3^u - a_1^u)}{4} + a_1^u + \left[\frac{(a_4^l - a_1^l) + (\beta_1 \cdot a_2^l - a_1^l) + (\beta_2 \cdot a_3^l - a_1^l)}{4} + a_1^l \right]}{2}$$

б) Wang и др. (2016) дефинисали су поступак за израчунавање дефазификоване, односно очекиване вредности $IT2TrFN$, $E(\tilde{A})$:

$$E(\tilde{A}) = \frac{E(\tilde{A}^L) + E(\tilde{A}^U)}{2} = \frac{\beta(a_1^l + a_2^l + a_3^l + a_4^l) + (a_1^u + a_2^u + a_3^u + a_4^u)}{8}$$

где је:

$$E(\tilde{A}^L) = \frac{\beta(a_1^l + a_2^l + a_3^l + a_4^l)}{4}$$

и

$$E(\tilde{A}^U) = \frac{a_1^u + a_2^u + a_3^u + a_4^u}{4}$$

Важе следећи услови:

$$\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = 1; \quad \beta = \beta_1 = \beta_2, \quad \beta \in [0,1]$$

в) Поступак одређивања очекиване вредности $IT2TrFN$, $E(\tilde{A})$, у раду (Hu и др., 2013) дефинисан је на следећи начин:

$$E(\tilde{A}) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (a_i^u + a_i^l) \right) \cdot \frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^2 \alpha_i + \beta_i \right)$$

г) Nie и Tan (2008) представили су поступак за одређивање тежишта $IT2FN$, A_C :

$$A_C = \left(\sum_{i=1}^N a_i^u \cdot \alpha(a_i^u) + \sum_{i=1}^N a_i^l \cdot \beta(a_i^l) \right) / \left(\sum_{i=1}^N \alpha(a_i^u) + \sum_{i=1}^N \beta(a_i^l) \right)$$

где $\alpha(a_i^u)$ означава вредност припадности сваког елемента a_i^u , $i = 1, \dots, N$, горњој функцији припадности, \tilde{A}^U и $\beta(a_i^l)$ означава вредност припадности сваког елемента a_i^l , $i = 1, \dots, N$ доњој функцији припадности, \tilde{A}^L .

Приказани поступци дефинисани за дефазификацију $IT2TrFN$ могу се применити и на $IT2TFN$, али се тада $IT2TFN$ разматра као $IT2TrFN$, тако да важе следећи услови: $a_2^u = a_3^u$ и $a_2^l = a_3^l$, односно $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ и $\beta = \beta_1 = \beta_2$.

Неки од поступака за одређивање дистанци између два $IT2FNs$

Дефиниција 16. Нека су дата два $IT2TrFNs$, \tilde{A} и \tilde{B} :

$$\tilde{A} = (\tilde{A}^U, \tilde{A}^L) = \left((a_1^u, a_2^u, a_3^u, a_4^u; \alpha_1(\tilde{A}^U), \alpha_2(\tilde{A}^U)), (a_1^l, a_2^l, a_3^l, a_4^l; \beta_1(\tilde{A}^L), \beta_2(\tilde{A}^L)) \right)$$

$$\tilde{B} = (\tilde{B}^U, \tilde{B}^L) = \left((b_1^u, b_2^u, b_3^u, b_4^u; \alpha_1(\tilde{B}^U), \alpha_2(\tilde{B}^U)), (b_1^l, b_2^l, b_3^l, b_4^l; \beta_1(\tilde{B}^L), \beta_2(\tilde{B}^L)) \right)$$

а) Еуклидова дистанца између \tilde{A} и \tilde{B} одређује на следећи начин (*Gao* и *Gao*, 2019):

$$d_E(\tilde{A}, \tilde{B}) = a \cdot d_E^U + b \cdot d_E^L$$

важе услови да:

$$a + b = 1;$$

$$0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1;$$

У случају када су $a = 0,5$ и $b = 0,5$ израз за одређивање $d_e(\tilde{A}, \tilde{B})$ се може записати на следећи начин:

$$d_E(\tilde{A}, \tilde{B}) = \frac{d_E^U + d_E^L}{2}$$

Дистанце између горњих функција припадности фази бројева \tilde{A} и \tilde{B} , d_E^U , као и дистанце између доњих функција припадности фази бројева \tilde{A} и \tilde{B} , d_E^L , одређују се на следећи начин:

$$d_E^U = \left\{ \frac{1}{4} \left[(a_1^u - b_1^u)^2 + (a_2^u \cdot \alpha_1(\tilde{A}^U) - b_2^u \cdot \alpha_1(\tilde{B}^U))^2 + (a_3^u \cdot \alpha_2(\tilde{A}^U) - b_3^u \cdot \alpha_2(\tilde{B}^U))^2 + (a_4^u - b_4^u)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$d_E^L = \left\{ \frac{1}{4} \left[(a_1^l - b_1^l)^2 + (a_2^l \cdot \beta_1(\tilde{A}^L) - b_2^l \cdot \beta_1(\tilde{B}^L))^2 + (a_3^l \cdot \beta_2(\tilde{A}^L) - b_3^l \cdot \beta_2(\tilde{B}^L))^2 + (a_4^l - b_4^l)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

б) Хемингова дистанца између \tilde{A} и \tilde{B} одређује на следећи начин (*Nehi* и *Keikha*, 2016; *Heidarzade*, *Mahdavi* и *Mahdavi-Amiri*, 2016):

$$d_H(\tilde{A}, \tilde{B}) = \frac{d_H^U + d_H^L}{2}$$

$$d_H^U = \left\{ \frac{1}{4} \left[|a_1^u - b_1^u| + |a_2^u - b_2^u| + |a_3^u - b_3^u| + |a_4^u - b_4^u| + \max(|\alpha_1(\tilde{A}^U) - \alpha_1(\tilde{B}^U)|, |\alpha_2(\tilde{A}^U) - \alpha_2(\tilde{B}^U)|) \right] \right\}$$

$$d_H^L = \left\{ \frac{1}{4} \left[|a_1^l - b_1^l| + |a_2^l - b_2^l| + |a_3^l - b_3^l| + |a_4^l - b_4^l| + \max(|\beta_1(\tilde{A}^L) - \beta_1(\tilde{B}^L)|, |\beta_2(\tilde{A}^L) - \beta_2(\tilde{B}^L)|) \right] \right\}$$

в) У раду (*Chen*, 2000) дефинисан је *Vertex* метод за одређивање дистанци између два фази броја. За потребе одређивања дистанци између два *IT2TrFNs*, \tilde{A} и \tilde{B} , *Vertex* метод се може прилагодити на следећи начин (*Sharaf*, 2020):

$$d_V(\tilde{A}, \tilde{B}) = \left\{ \frac{1}{8} \left[(a_1^u - b_1^u)^2 + (a_2^u - b_2^u)^2 + (a_3^u - b_3^u)^2 + (a_4^u - b_4^u)^2 + (a_1^l - b_1^l)^2 + (a_2^l - b_2^l)^2 + (a_3^l - b_3^l)^2 + (a_4^l - b_4^l)^2 + (\alpha_1(\tilde{A}^U) - \alpha_1(\tilde{B}^U))^2 + (\alpha_2(\tilde{A}^U) - \alpha_2(\tilde{B}^U))^2 + (\beta_1(\tilde{A}^L) - \beta_1(\tilde{B}^L))^2 + (\beta_2(\tilde{A}^L) - \beta_2(\tilde{B}^L))^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Приказани поступци дефинисани за одређивање дистанци између два $IT2TrFN$ могу се применити и на $IT2TFN$, али се тада $IT2TFN$ разматра као $IT2TrFN$, тако да важе следећи услови: $a_2^u = a_3^u$ и $a_2^l = a_3^l$, односно $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ и $\beta = \beta_1 = \beta_2$.

2.2 ОСНОВНА РАЗМАТРАЊА О FMEA АНАЛИЗИ

Анализа и процена ризика реализације сваког пословног процеса, како на стратегијском, тако и на оперативном нивоу, представља један од најважнијих менаџмент задатака. Анализу и процену ризика потребно је спроводити континуално и систематски са циљем да се успостави ефикасан и довољно поуздан систем управљања ризиком. На тај начин се могу избећи непредвиђене, нежељене и опасне ситуације, које потенцијално могу да доведу до озбиљних материјалних, безбедносних и других последица. Из тог разлога, све већа пажња, како у релевантној литератури, тако и у пракси, усмерена је ка примени и унапређењу метода за идентификацију, анализу и процену ризика.

У теорији и пракси познате су различите методе и технике анализе и процене ризика. Једна од најшире коришћених метода у ову сврху је *FMEA* анализа. Ова метода (у литератури често означена и као анализа или инжењерска техника) се први пут помиње 1949. године у оквиру документа, односно војне процедуре, Оружаних снага Сједињених Америчких Држава, под службеним кодом *MIL-P 1629*, а под називом, који у слободном преводу гласи: „Процедуре за спровођење анализе начина отказа, ефеката и анализе критичности” (енгл. *Procedures for performing a Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*). Првобитна намена *FMEA* анализе било је управљање ризиком у домену реализације војних мисија, као и у домену безбедности војника и поузданости опреме (Carlson, 2015; *United States Military Forces*, 1949). Ипак, у релевантној литератури се могу пронаћи различите тврдње када је у питању настанак и прва употреба ове анализе. Поједини аутори сматрају да се *FMEA* анализа први пут званично појавила 1963. године и да је развијена од стране Националне ваздухопловне и свемирске администрације САД-а (енгл. *National Aeronautics and Space Administration*, скр. *NASA*) (Chang, Wei и Lee, 1999). Према овој теорији, *NASA* је *FMEA* анализу први пут користила радећи на свемирском програму Аполо (енгл. *Apollo*), а да је тек осамдесетих година XX века усвојена од стране Оружаних снага САД-а (Cao и Deng, 2019).

У аутомобилској индустрији, *FMEA* анализа је први пут коришћена у компанији Форд Мотор, која је први пут, као саставни део својих процедура, имплементирала ову анализу 1977. године. Основна сврха примене *FMEA* анализе у овој компанији била је идентификација проблема који могу да настану у фази дизајна и током реализације процеса производње, а са циљем да се побољша квалитет финалног производа, а самим тим и повећа задовољство купаца (Chang, Wei и Lee, 1999).

Данас се *FMEA* анализа, осим у аутомобилској индустрији (Banduka и др., 2020), примењује и у области енергетике (Arabian-Hoseynabadi, Oraee и Tavner, 2010), софтверског инжењерства (Đurić и др., 2019), здравствене заштите (Abbasgholizadeh Rahimi и др., 2015) прехранбене индустрије (Scipioni и др., 2002), хемијске индустрије (Rezaee и др., 2020), као и у многим другим привредним секторима.

У релевантној литератури се могу пронаћи многобројне дефиниције и различита објашњења *FMEA* анализе. Према (Carlson, 2012), *FMEA* анализа настала је са циљем да омогући (Carlson, 2012):

- препознавање и систематизовање потенцијалних начина отказа, њихових узрока, као и ефеката (последича) појаве отказа, који се могу одразити, како на квалитет и поузданост производа/процеса, тако и на крајње купце/кориснике,
- процену ризика кроз идентификовање начина отказа, њихових ефеката и узрока, у циљу одређивања приоритета спровођења одговарајућих мера и
- идентификацију и спровођење одговарајућих мера у циљу решавања најозбиљнијих проблема.

Сличну дефиницију *FMEA* анализе дају и други аутори, па се тако у литератури може пронаћи дефиниција да је *FMEA* техника за анализу ризика која се заснива на идентификовању потенцијалних начина отказа, анализирању основних узрока и испитивању начина за смањење њиховог утицаја (*Abdelgawad* и *Fayek*, 2010).

Чест је случај да се *FMEA* у литератури поистовећује са *FMECA* (енгл. *Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*) анализом. Ове две методе имају заједничку основу, али их не треба у потпуности изједначавати. Као што се може закључити из назива *FMECA*, ова анализа има једну димензију више у односу на *FMEA*, а то је тзв. анализа критичности (енгл. *Criticality Analysis*, скр. *CA*). Другим речима, *FMECA* је надограђена *FMEA* анализа, па се стога може рећи да је за спровођење *FMECA* најпре потребно спровести *FMEA* анализу, а након тога је потребно спровести и *CA*. У пракси, помоћу *FMEA*, идентификују се потенцијални начини отказа, као и њихови ефекти, док се након тога, применом *CA* одређује важност идентификованих начина отказа и врши се њихова класификација према приоритету. *CA* се врши на основу различитих параметара, и то најчешће према стопи отказа (учесталости и вероватноћи појаве) и степену озбиљности отказа. Важно је нагласити да се *FMECA* најчешће користи у области војне индустрије (*Lipol* и *Haq*, 2011).

Домен истраживања у овој дисертацији је аутомобилска индустрија. Оно што је специфично за аутомобилску индустрију, а по чему се примена *FMEA* анализе разликује у односу на многе друге гране прерађивачке индустрије, али и у односу на многе друге области привреде, јесте чињеница да је коришћење ове анализе у аутомобилској индустрији прописано и захтевано међународним стандардом. Међународни стандард *IATF 16949:2016* наследник је серије стандарда *ISO/TS 16949* и прописан је од стране Међународне аутомобилске радне групе (енгл. *International Automotive Task Force*, скр. *IATF*) (*IATF16949:2016*, 2017). Стандард *IATF 16949:2016* је заправо, у основи, Систем менаџмента квалитетом (енгл. *Quality Management System*, скр. *QMS*), односно стандард *ISO 9001*, прилагођен потребама и специфичностима аутомобилске индустрије (*Laskurain-Iturbe* и др., 2021). Поред наведеног стандарда, *FMEA* анализа је један од захтева *APQP* оквира (енгл. *Advanced Product Quality Planning*) за напредно планирање квалитета производа, који се такође примењује у аутомобилској индустрији. Такође, *PPAP* (енгл. *Production Part Approval Process*), односно, у слободном преводу, Процес одобравања производних делова, баш као и *APQP*, један је од оквира који су захтевани од стране Акционе групе за аутомобилску индустрију (енгл. *Automotive Industry Action Group*, скр. *AIAG*), а као један од захтева које ови оквири садрже је и примена *FMEA* анализе.

2.2.1 Основни појмови у традиционалној *FMEA* анализи

Када се говори о традиционалној *FMEA* анализи, подразумева се да извештај треба да садржи основне елементе анализе. Заправо, извештај садржи све значајне појмове у домену *FMEA* анализе, који су надаље приказани и укратко објашњени (*Carlson, 2012; Carlson, 2015*):

Ставка (енгл. *Item*) – У случају примене *FMEA* анализе, у домену процеса производње, под овим појмом се подразумева активност процеса која се разматра. Ако се *FMEA* примењује у фази дизајна производа, онда се под овим појмом подразумева подсистем или компонента која се разматра.

Функција (енгл. *Function*) – Односи се на функцију/намену разматране производне активности, у случају примене *FMEA* анализе у домену процеса производње, односно на функцију/намену подсистема или компоненте, у случају када се *FMEA* анализа примењује у фази дизајна производа.

Начин отказа (енгл. *Failure Mode*) – Начин на који *ставка* (активност, подсистем, компонента и сл.) не извршава предвиђену *функцију* или не испуњава постављене захтеве. Осим појма „начин отказа”, у литератури се често користите и појмови „отказ” и „грешка” (енгл. *Failure*).

Ефекат начина отказа (енгл. *Effect*) – Последица реализације отказа која се може манифестовати на различите начине.

Озбиљност ефекта (енгл. *Severity (S)*) – Процењена вредност на мерној скали [1-10] која показује у којој мери најважнији *ефекат* разматраног *начина отказа* има утицаја на разматрану *функцију*.

Потенцијални узрок појаве начина отказа (енгл. *Cause*) – Разлог због којег долази до појаве отказа, односно узрок због којег се отказ реализује.

Учесталост појаве начина отказа (енгл. *Occurrence (O)*) – Процењена/измерена вредност или вероватноћа изражена на мерној скали [1-10], која показује у којој мери (колико често) се може очекивати појава разматраног *узрока појаве начина отказа*, а самим тим и *начина отказа*.

Контрола (енгл. *Control*) – Активности или методе чија је примена тренутно у плану или које се већ имплементирају у циљу смањења или елиминисања нивоа ризика који се односи на реализацију *узрока појаве начина отказа*.

Детекција/откривање узрока појаве начина отказа (енгл. *Detection (D)*) - Процењена вредност на мерној скали [1-10] која показује у којој мери је комплексан/изводљив поступак детекције *узрока појаве начина отказа*.

Коефицијент (број) приоритета ризика (енгл. *Risk priority number (RPN)*) – Вредност на основу које се рангирају потенцијални *начини отказа*, а која зависи од вредности параметара (фактора ризика) *S*, *O* и *D*.

RPN се рачуна као производ параметара *S*, *O* и *D* (*Stamatis, 2003; Shahin, 2004; Carlson, 2012*):

$$RPN = S \cdot O \cdot D$$

где најмања вредност овог параметра може да буде 1, а највећа 1000 (*Stamatis, 2003*).

У релевантној литератури постоје подељена мишљења о томе које начине отказа је потребно третирати, у зависности од вредности *RPN* параметра. У раду (*Banduka* и др., 2016) аутори износе тврдњу да је у аутомобилској индустрији најчешћи случај да се као озбиљни разматрају они начини отказа за које је вредност $RPN \geq 100$, односно вредност макар једног од параметара *S*, *O* и *D* ≥ 8 . Слично овој тврдњи, *Schuller* и др. (2017) сугеришу да се као озбиљни начини отказа сматрају они чија је вредност $RPN \geq 100$ или они за које је вредност макар једног од параметара *S*, *O* и *D* једнака 9 или 10. Поједини аутори, као нпр. *Renjith, Kumar* и *Madhavan* (2018), усвајају различите скале мера и приоритета према вредности *RPN* параметра. Стога се може закључити да критична вредност *RPN*-а, у великој мери, зависи од области примене *FMEA* анализе и од специфичности разматраног проблема.

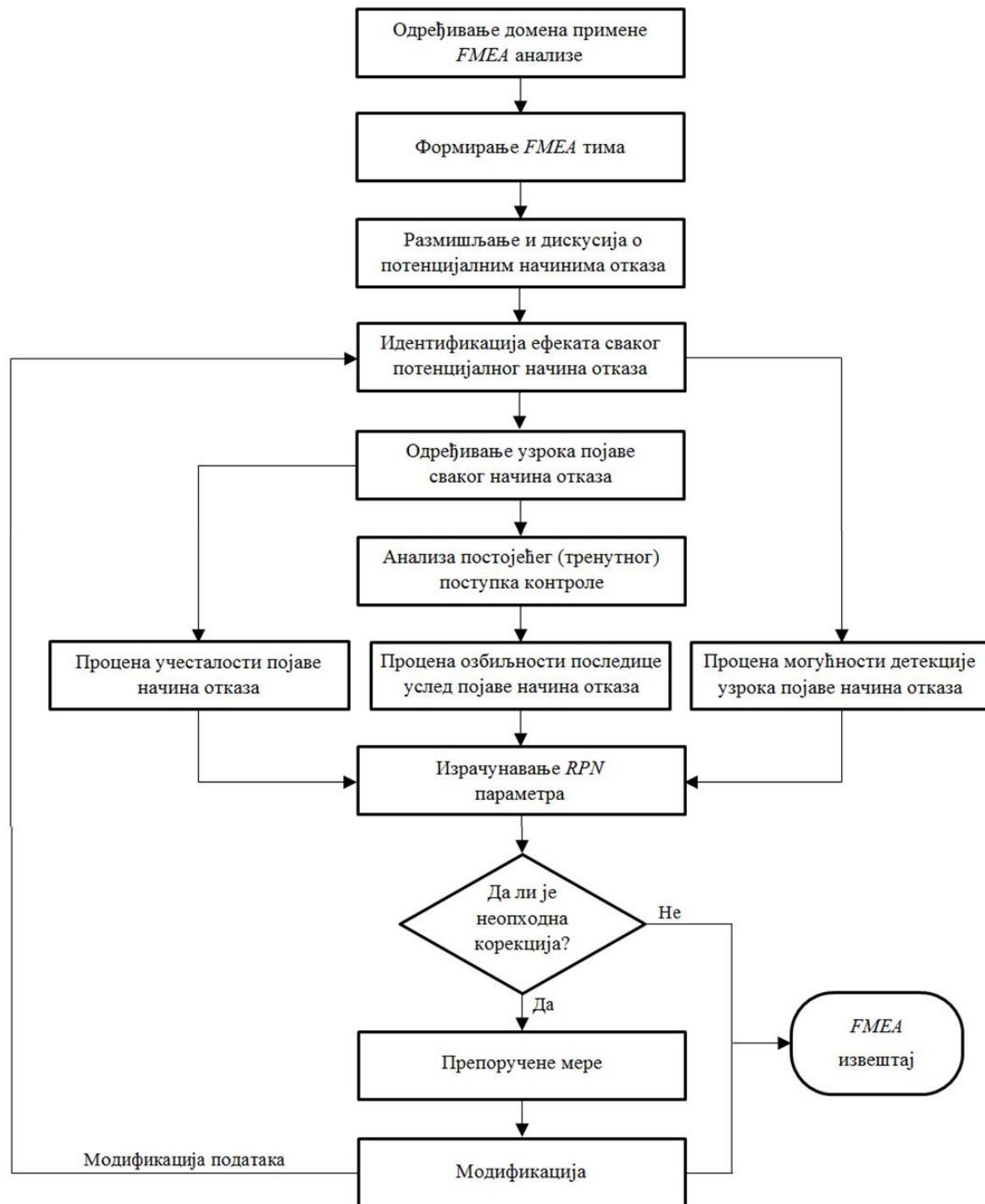
За имплементацију *FMEA* анализе у предузећу задужен је тзв. *FMEA* тим. Спровођење *FMEA* анализе захтева добру сарадњу чланова тима, који су у потпуности упознати са *FMEA* методологијом, али и са разматраном облашћу деловања (нпр. дизајн производа или производни процес). *FMEA* тим треба да буде сачињен од експерата из различитих пословних процеса, јер је мултидисциплинарност тима пожељна. Често су чланови *FMEA* тима експерти из области производње, квалитета, одржавања, технологије, дизајна и других пословних процеса и функција. *FMEA* тим одлуке доноси консензусом (*Belu* и др., 2012). Најчешћи број чланова *FMEA* тима је од 4 до 6 (*Dyadem Press*, 2003), али свакако да број чланова може да варира у зависности од потребе.

Најважнији члан *FMEA* тима је тим лидер (*FMEA* лидер). То је заправо особа одговорна за координацију активности током спровођења *FMEA* анализе, односно она која према својим личним и професионалним карактеристика има способност да обавља ту функцију. Тим лидер не треба да има улогу доминантне особе у групи, која ће сама доносити одлуке, већ његова улога више одговара улози модератора (*Dyadem Press*, 2003).

2.2.2 Поступак примене традиционалне *FMEA* анализе

Као што је претходно наведено, традиционална *FMEA* анализа се заснива на одређивању приоритета ризика, посредством *RPN*-а, који се израчунава као производ три фактора ризика: озбиљности ефекта/последнице (*S*), учесталости појаве начина отказа (*O*) и могућности детекције узрока појаве начина отказа (*D*) (*Wang* и др., 2009). У раду (*Pillay* и *Wang*, 2003) аутори су представили 12 основних корака примене традиционалне *FMEA* анализе. Модификацију наведених корака представио је *Liu* у књизи (*Liu*, 2016), позивајући се управо на рад (*Pillay* и *Wang*, 2003). Овај аутор је број корака редуковао на 9, али суштински ништа није промењено, већ је само поступак систематизован и детаљније објашњен.

Кораци традиционалне *FMEA* анализе могу се приказати и у виду дијаграма, што је и урађено у раду (*Pillay* и *Wang*, 2003), а такође модификовано и приказано у књизи (*Liu*, 2016). На слици 2.6 шематски су приказани кораци традиционалне *FMEA*, док је у наставку објашњен сваки од наведених корака.



Слика 2.6 – Основни кораци традиционалне FMEA анализе (Pillay и Wang, 2003; Liu, 2016)

Кораци примене традиционалне FMEA анализе, представљени на слици 2.6, могу се објаснити на следећи начин (Pillay и Wang, 2003; Liu, 2016):

Корак 1: Први и основни корак спровођења FMEA анализе односи се на дефинисање њеног домена примене. Веома је важно да се овај корак спроведе, како би се утврдиле јасне границе примене методе, са циљем да се одреди правилан приступ у имплементацији FMEA анализе за разматрани домен.

Корак 2: За успешно спровођење *FMEA* анализе потребно је формирати компетентан тим, сачињен од експерата из различитих области. Разлог томе је што се *FMEA* анализа заснива на тимском раду и групном доношењу одлука. Као што је већ речено, овакав тим се назива „*FMEA* тим”. Потребно је да сви чланови тима имају одређени ниво знања о тимском раду и правилима понашања у тиму, о задацима, као и о проблему који се разматра. Особа која најбоље познаје разматрани проблем, а пре свега има и изражене вештине вођења тима, треба да буде изабрана за тим лидера. Важно је напоменути да тим треба да буде крос-функционалан и мултифункционалан.

Корак 3: Потребно је декомпоновати систем на подсистеме и/или склопове у циљу једноставније анализе њихових компонената, а све то зарад бољег разумевања функционисања читавог система. Пожељно је користити различите ознаке, шеме и дијаграме како би јасно биле представљене компоненте и њихова повезаност. Такође, важно је израдити детаљну листу компонената за сваки подсистем и/или склоп.

Корак 4: Како би сви чланови *FMEA* тима били детаљно упознати са разматраним проблемом, потребно је спровести низ брејнсторминг сесија. Циљ спровођења сесија је пописивање свих потенцијалних начина отказа који могу да имају утицај на квалитет производа, њихових узрока, као и ефеката које могу изазвати идентификовани начини отказа. Треба узети у обзир да за један начин отказа може бити везан један или више ефеката.

Корак 5: Неопходно је проценити вредности фактора ризика *S*, *O* и *D* за сваки начин отказа. Обично се вредности ова три фактора ризика процењују на скали [1-10], где вредност 1 означава најмањи утицај фактора ризика, док вредност 10 означава највећи утицај фактора ризика.

Корак 6: Множењем вредности наведена три фактора ризика израчунава се вредност *RPN*-а. Такође, у овом кораку се може израчунати и тзв. укупан *RPN*, сабирањем *RPN* вредности свих идентификованих начина отказа, како би се ови резултати могли упоредити са резултатима који се добијају након спроведених корективних мера (након поновљене *FMEA* анализе).

Корак 7: Одређивање приоритета за сваки начин отказа. Према одређеном приоритету начина отказа, дефинише се и приоритет одговарајућих мера. Обично се ове мере могу сврстати у три категорије: 1) за елиминисање начина отказа, 2) за побољшање могућности детекције узрока појаве начина отказа и 3) за смањење губитака у случају реализације начина отказа.

Корак 8: Поступак примене и најважније информације о спроведеној *FMEA* анализи потребно је документовати у виду *FMEA* извештаја. Овакав извештај остаје као доказ да је анализа спроведена и може бити од значаја за убудуће.

Корак 9: Поновна процена ризика и израчунавање *RPN*-а. Дужност *FMEA* тима је да поново изврши процену вредности сваког фактора ризика (*S*, *O* и *D*) за сваки начин отказа. Поновна процена ризика је веома важна из разлога што показује колико је вредност ризика, повезана са сваким начином отказа, редукована или (евентуално) потпуно елиминисана. Другим речима, колико су предложене мере имале ефекта. Дугорочни циљ спровођења *FMEA* анализе је да се елиминише могућност појаве сваког потенцијалног начина отказа, а краткорочни циљ је да се утицај отказа редукује, уколико није могуће његово потпуно елиминисање.

У литератури, када се говори о традиционалној *FMEA* анализи, могу се пронаћи веома сличне варијанте оцена, односно квалитативних и квантитативних скала мера, које се користе за процену вредности фактора ризика *S*, *O* и *D* (видети радове (*Wang* и др., 2009; *Pillay* и *Wang*, 2003; *Liu* и др., 2011; *Liu* и др., 2012; *Liu*, 2016). У табелама 2.1, 2.2 и 2.3 представљене су мерне скале за процену наведена три фактора ризика које су приказане у раду (*Pillay* и *Wang*, 2003).

Табела 2.1 – Традиционална *FMEA* скала за озбиљност ефекта, *S* (*Pillay* и *Wang*, 2003)

Озбиљност ефекта	Оцена
Занемарљива	1
Ниска	2
	3
Средња	4
	5
	6
Висока	7
	8
Веома висока	9
	10

Табела 2.2 – Традиционална *FMEA* скала за учесталост појаве отказа, *O* (*Pillay* и *Wang*, 2003)

Могућност појаве	Оцена	Могућа стопа отказа (у односу на број радних дана)
Занемарљива	1	< 1:20.000
Ниска	2	1:20.000
	3	1:10.000
Средња	4	1:2.000
	5	1:1.000
	6	1:200
Висока	7	1:100
	8	1:20
Веома висока	9	1:10
	10	1:2

Табела 2.3 – Традиционална *FMEA* скала за могућност детекције појаве отказа, *D* (*Pillay* и *Wang*, 2003)

Комплексност детекције	Оцена	Вероватноћа детекције (%)
Занемарљива	1	86 – 100
Ниска	2	76 – 85
	3	66 – 75
Средња	4	56 – 65
	5	46 – 55
	6	36 – 45
Висока	7	26 – 35
	8	16 – 25
Веома висока	9	6 – 15
	10	0 – 5

Наведене мерне скале и остали елементи приказани у табелама могу варирати у зависности од домена примене и проблема који се разматра (Liu, 2016).

2.2.3 Недостаци и ограничења традиционалне FMEA анализе

FMEA је веома корисна инжењерска техника, чијим се спровођењем могу остварити различити бенефити. Другим речима, ова анализа помаже у (Dyadem Press, 2003):

- идентификовању и процени потенцијалних начина отказа у систему, као и њихових ефеката, што помаже у дефинисању мера за њихово елиминисање,
- сагледавању карактеристика дизајна производа и реализације процеса,
- идентификовању критичних карактеристика производа и процеса,
- побољшању продуктивности, квалитета, безбедности и смањењу трошкова,
- утврђивању потреба за избором алтернативних материјала, делова, уређаја, компонената и поступака,
- документовању разлога за извршење промена,
- остварењу комуникације и сарадње између различитих сектора предузећа,
- повећању задовољства купаца и
- унапређењу репутације и конкурентности предузећа.

Поред свих бенефита које пружа примена FMEA анализе, она има и одређене недостатке и ограничења, нарочито у методолошком смислу, односно у домену процене ризика. У литератури се могу пронаћи радови у којима су анализирани недостаци конвенционалне/традиционалне FMEA анализе. Тако се у (Dyadem Press, 2003), у смислу основних ограничења анализе, наводи то да:

- анализа комплексних, мултифункционалних система, који се састоје од великог броја компонената, може бити напорна и монотона,
- ефекти отказа код комплексних система се не могу једноставно анализирати,
- укључивање свих могућих фактора који могу утицати на производ/процес, као што су људски фактор или утицај на животну средину, може успорити примену анализе и захтева темељно познавање карактеристика и перформанси различитих компонената система,
- успешно спровођење анализе захтева високу стручност, искуство и вештине тимског рада,
- обрада велике количине података може да буде веома захтевна и
- спровођење анализе може да буде скупо и дуготрајно.

Carlson (2015) као основни проблем у примени FMEA анализе види непоузданост RPN параметра. Овај аутор наводи да се проблем јавља приликом процене вредности фактора ризика (S , O и D), јер је њихова вредност резултат субјективне процене чланова FMEA тима, а не, као што и треба да буде, објективна процена. Такође, исти аутор наводи и више недостатака, који су у великој мери повезани са појавом дуплирања вредности RPN параметра. Различите комбинације фактора ризика S , O и D могу резултовати истом вредношћу RPN-а, што не одговара реалном стању у пракси (Carlson, 2015). Lolli и др. (2015), наведеним недостацима, додају и чињеницу да се у класичној FMEA анализи не узима у обзир релативни значај S , O и D , као и то да је вредност ових фактора ризика веома тешко прецизно проценити. Исти недостаци или ограничења RPN-а наведени су и у раду (Chang, Chang и Lai, 2014).

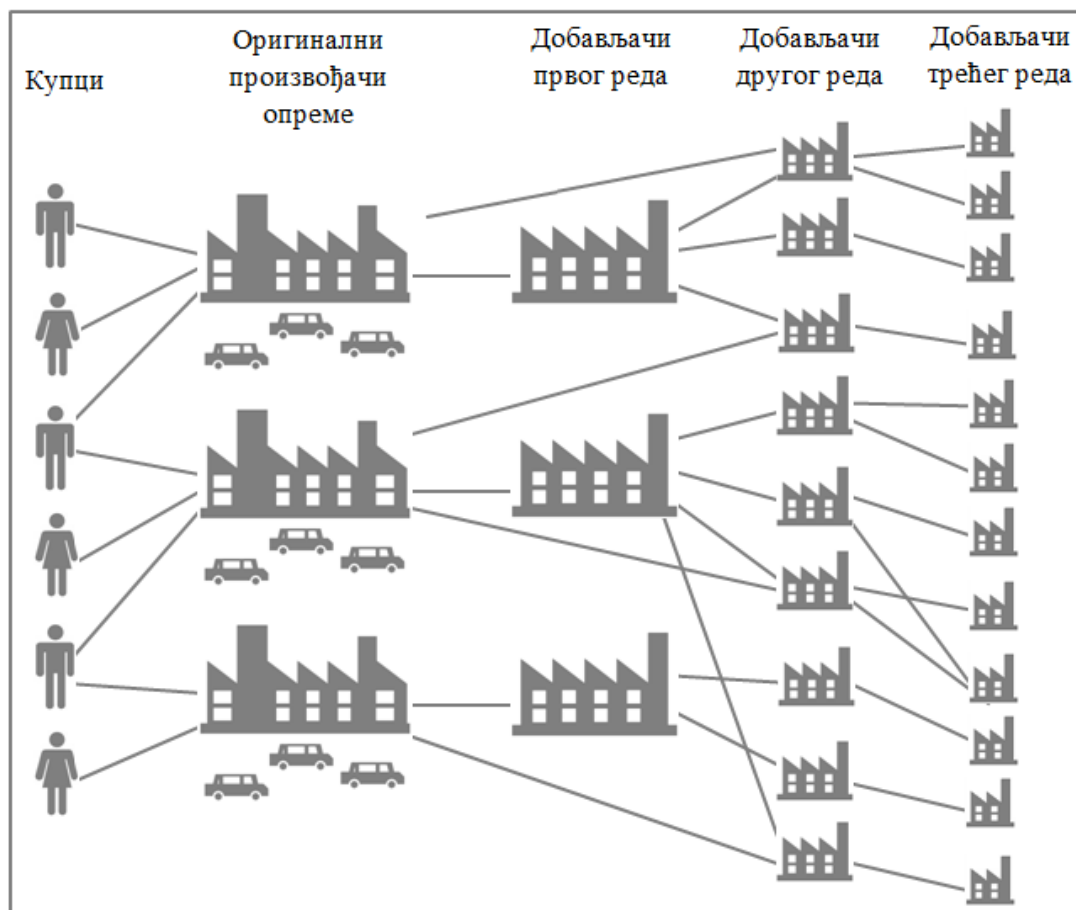
На основу детаљног и свеобухватног прегледа релевантне литературе у области *FMEA* анализе, *Liu* и др. (2013) су формирали свеобухватну листу недостатака и ограничења традиционалне *FMEA* анализе који се помињу у литератури. Аутори овог рада посебну пажњу посветили су недостацима анализе у домену процене ризика. Листу недостатака представљену у овом раду, *Hu-Chen Liu (Liu, 2016)* је систематизовао, проширио и детаљније објаснио. Основни недостаци *FMEA* анализе у домену процене ризика су (*Liu* и др., 2013; *Liu, 2016*):

- 1) У традиционалној *FMEA* анализи подразумева се да фактори ризика *S*, *O* и *D* имају једнаку релативну важност. Заправо, ово веома често не одговара реалном стању у пракси.
- 2) Различите вредности фактора ризика *S*, *O* и *D* потенцијално могу да резултују истом вредношћу *RPN* параметра.
- 3) За чланове *FMEA* тима може да буде веома тежак задатак да процене вредности фактора ризика прецизним бројевима. Боља је варијанта да *FMEA* тим своје процене исказује користећи лингвистичке исказе, попут: „вероватно”, „важно”, „веома високо” и сл.
- 4) Коришћење математичког израза за израчунавање *RPN*-а је упитно, јер се израз не заснива на доказаној научној основи. Не постоји прецизно образложење због чега се вредности фактора ризика *S*, *O* и *D* множе како би се израчунао *RPN*.
- 5) Примена методологије процене ризика не узима у обзир директну и индиректну повезаност начина отказа и узрока појаве отказа.
- 6) Разматрани фактори ризика процењују се према дискретним, ординалним мерним скалама. Упитно је да ли поступак множења у оваквом случају има смисла.
- 7) *RPN* узима у обзир само три фактора ризика (*S*, *O* и *D*), а фактор ризика *S* углавном са аспекта квалитета и безбедности. Остали важни аспекти, као нпр. економски, су занемарени.
- 8) За сваки од три фактора ризика разликује се начин пресликавања процена на мерну скалу [1-10]. Однос између вредности *O* и придружених оцена (описних скала) је нелинеаран, док је однос између вредности *D* и придружених оцена линеаран (видети табеле 2.2 и 2.3).
- 9) Потенцијалне вредности *RPN*-а не чини низ узастопних бројева од 1 до 1000. Многе вредности у опсегу [1-1000] се не могу формирати из производа вредности ова три фактора ризика. Само 120 различитих вредности могуће је генерисати као производ *S*, *O* и *D*.
- 10) Чак и мале промене вредности једног од три фактора ризика могу да проузрокују релативно велике промене вредности *RPN*-а, што математичку формулу за израчунавање *RPN*-а чини веома осетљивом.
- 11) *RPN* се користи искључиво у сврху процене ризика и не утиче директно на прописивање одговарајућих корективних мера.
- 12) *RPN* мерна скала има нека неинтуитивна статистичка својства. Упркос томе што мерна скала почиње вредношћу 1, а завршава се вредношћу 1000, веома је тешко одредити вредност која означава средину ове мерне скале.

У научним радовима из области *FMEA* анализе често су њени недостаци и ограничења предмет истраживања. Многи аутори дају предлоге за превазилажење појединих недостатака и ограничења. Детаљније о овој теми разматрано је у потпоглављу 2.6, које се односи на преглед примене *FMEA* анализе и интеграцију ове методе са различитим оптимизационим методама.

2.2.4 *FMEA* у аутомобилској индустрији

Као што је већ речено, примена *FMEA* анализе у аутомобилској индустрији прописана је званичним међународним стандардом и сродним процедурама. *IATF 16949:2016* стандард је обавезујући за сва предузећа која егзистирају у неком ланцу снабдевања аутомобилске индустрије (*De Aguiar* и др., 2015). То заправо значи да је спровођење и документовање *FMEA* анализе потребно вршити у свим предузећима у ланцу снабдевања, почевши од предузећа која производе компоненте и полупроизводе, па све до предузећа у којима се врши завршна монтажа аутомобила. На слици 2.7 приказан је општи изглед ланца снабдевања у аутомобилској индустрији (*Oh* и др., 2010).



Слика 2.7 – Општи изглед ланца снабдевања у аутомобилској индустрији (прилагођено из (*Oh* и др., 2010))

Као што се може видети на слици 2.7, општи ланац снабдевања у аутомобилској индустрији чине (*Oh* и др., 2010):

- оригинални произвођачи опреме: врше монтажу главних система и појединачних склопова у финални производ;
- добављачи првог реда (кључни добављачи): израђују главне системе и склопове који се даље дистрибуирају до оригиналних произвођача опреме;
- добављачи другог реда: израђују мање комплексне склопове које даље дистрибуирају оригиналним произвођачима опреме и добављачима првог реда;
- добављачи трећег реда: израђују делове које најчешће дистрибуирају добављачима другог реда.

Иако стандарди и друге процедуре обавезују предузећа у аутомобилској индустрији да примењују *FMEA* анализу, у њима се не објашњава на који начин методу треба реализовати. Асоцијација *AIAG*, једна је од водећих у овој области у свету, а свакако најзначајнија на простору Северне Америке, иако окупља компаније и из неких других делова света, пре свега из Азије. Чланице ове асоцијације су многобројне важне компаније аутомобилске индустрије, међу којима су најпознатије Фијат Крајслер Аутомобили, Ценерал моторс, Тојота, Хонда, Делфи и друге (*AIAG*, званични сајт). Ова асоцијација је претходно за своје чланице израдила и прописала коришћење четири издања упутства за примену *FMEA* анализе, од којих је последње, под називом *AIAG 4th Edition FMEA – Reference Manual*, замењено најновијим, издатим 2019. године. Заправо, најновије издање, *AIAG* асоцијација није издала самостално. У сарадњи са Немачком асоцијацијом за аутомобилску индустрију (нем. *Verband der Automobilindustrie*, скр. *VDA*) издат је први заједнички приручник за имплементацију *FMEA* анализе у аутомобилској индустрији. Чланице *VDA* до сада нису користиле упутство прописано од стране *AIAG*-а, већ је њихова асоцијација имала своје упутство под називом *Product and Process FMEA: Volume 4*, које је такође, пре заједничког, доживело четири издања. Колико је ова асоцијација утицајна на простору Немачке, али и целе Европе, може се закључити на основу тога што су само неке од чланица ове асоцијације: Мерцедес-Бенц, Фолксваген, Опел, Ауди, МАН и многе друге (*VDA*, званични сајт). Како би се превазишле постојеће разлике које су постојале у упутствима ове две асоцијације и унифицирао начин примене *FMEA* анализе, *AIAG* и *VDA* издале су први заједнички приручник под називом *AIAG&VDA FMEA Handbook (AIAG&VDA, 2019)*. Прво издање *FMEA Handbook* приручника донело је велике промене у примени *FMEA* анализе, о чему је нешто више речено у даљем тексту ове дисертације.

Према најновијем издању приручника *FMEA Handbook* могу се разликовати три основна случаја/начина примене *FMEA* анализе у предузећима аутомобилске индустрије. Тако се *FMEA* може применити у случају (*AIAG&VDA, 2019*):

- 1) новог дизајна, нове технологије или новог процеса,
- 2) нове примене на постојећи дизајн или процес и
- 3) инжењерских промена постојећег дизајна или процеса.

Када је реч о првом случају, *FMEA* анализа се реализује од самог почетка, односно од планирања, па све до развоја и примене новог дизајна, нове технологије или новог процеса. У другом случају, *FMEA* анализа се примењује када се постојећи дизајн или процес реализује у неком новом окружењу, на новој локацији или када има измењену намену. Инжењерске промене постојећег дизајна или процеса настају услед потребе за увођењем технолошких промена, појаве нових захтева, повлачења производа са тржишта или услед појаве других непредвиђених ситуација (*AIAG&VDA, 2019*).

FMEA Handbook даје упутство за спровођење три различита типа *FMEA* анализе, а то су (*AIAG&VDA*, 2019):

- *FMEA* дизајна или скраћено *DFMEA* (енгл. *Design Failure Mode and Effect Analysis*),
- Процесна *FMEA* или скраћено *PFMEA* (енгл. *Process Failure Mode and Effect Analysis*) и
- Допунска *FMEA* мониторинга и одзива система или скраћено *FMEA-MSR* (енгл. *Supplemental FMEA for Monitoring & System Response*).

DFMEA* анализа** се може дефинисати као аналитичка техника, коју првенствено користи инжењер/тим одговоран за дизајн производа. У овом случају, *DFMEA* је средство којим се осигурава, колико је год то могуће, да потенцијални начини отказа и повезани узроци или механизми појаве начина отказа буду елиминисани/редуковани, пре него што процес дизајна дела/производа буде завршен и буде спреман за испоруку производном процесу. С друге стране, спровођење ***PFMEA* анализе** заснива се на анализи потенцијалних начина отказа у процесу производње, монтаже и логистике, како би се производи производили према захтевима дизајна. Трећи тип *FMEA* анализе, који препознаје *FMEA Handbook*, односно ***FMEA-MSR анализа, користи се за анализу потенцијалних начина отказа који могу да се јаве у условима коришћења производа од стране купца, тачније са аспекта доживљаја возача, функционисања возила и операција одржавања. Другим речима, анализа треба да покаже какве ефекте идентификовани начини отказа могу имати на систем, возило, људе и усклађеност са прописима. Такође, анализа треба да покаже да ли узроке и начине отказа детектује сам систем или возач (*AIAG&VDA*, 2019).

Предмет истраживања у овој дисертацији је процесна *FMEA*, односно *PFMEA* анализа, па је из тог разлога детаљније објашњена у наредној секцији, позивајући се на *AIAG&VDA FMEA Handbook*, са фокусом на примену анализе у аутомобилској индустрији.

2.2.5 Карактеристике *PFMEA* анализе према *AIAG&VDA FMEA HANDBOOK* приручнику

AIAG&VDA FMEA Handbook донео је велике промене у погледу примене *FMEA* анализе. Главни фокус у новом приручнику јесте елиминисање недостатака традиционалног *FMEA* поступка за процену ризика, који се заснива на одређивању вредности *RPN* параметра. У уводном поглављу овог приручника (*AIAG&VDA*, 2019), аутори истичу да је развијена методологија настала као резултат трогодишње сарадње предузећа која су у ланцу снабдевања на нивоу оригиналног произвођача опреме и предузећа која су добављачи првог реда, а која су чланице *AIAG* или *VDA* асоцијације.

У наставку овог потпоглавља истакнуте су најважније карактеристике *PFMEA* анализе представљене у новом *AIAG&VDA FMEA Handbook* приручнику.

***PFMEA* тим**

FMEA Handbook препознаје (*AIAG&VDA*, 2019): 1) основни и 2) проширени *PFMEA* тим. Основни *PFMEA* тим, по правилу, треба да чини група људи која се састоји од експерата из различитих домена, а то су најчешће (*AIAG&VDA*, 2019):

- тим лидер/модератор/фацитатор,
- процесни/производни инжењер,
- инжењер ергономије,
- инжењер за валидацију процеса,
- инжењер квалитета/поузданости и/или
- друге особе одговорне за развој процеса.

Чланови проширеног *PFMEA* тима могу да буду:

- инжењер дизајна/конструктор/пројектант,
- технички експерти,
- сервисни инжењер,
- менаџер пројекта,
- оператери одржавања,
- радници на производним линијама,
- запослени у сектору набавке,
- добављачи и
- остали (уколико је то неопходно).

Чланови основног *PFMEA* тима су задужени за спровођење анализе. Њихов задатак је да учествују у састанцима и буду директно укључени у све активности које се односе на спровођење *PFMEA* анализе у предузећу. С друге стране, чланови проширеног тима се укључују према потреби, тј. само када су неопходни за решавање специфичних проблема и ситуација (*AIAG&VDA*, 2019).

Кораци примене PFMEA анализе

У *FMEA Handbook* приручнику дефинисано је седам корака спровођења *PFMEA* анализе. Сваки од ових корака је у приручнику детаљно описан и објашњен. У овој дисертацији, представљени су искључиво најважнији задаци и активности сваког корака.

Планирање и припрема (корак 1): У оквиру овог корака врши се анализа свих производа/процеса и идентификација оних производа/процеса за које ће бити спроведена *PFMEA* анализа. Циљ је да се анализа најпре примени на процес/производе који су најважнији и/или најкритичнији. Такође, у овој фази се врши планирање коришћења расположивих ресурса у сврху имплементације анализе, али и у сврху спровођења прописаних мера (*AIAG&VDA*, 2019).

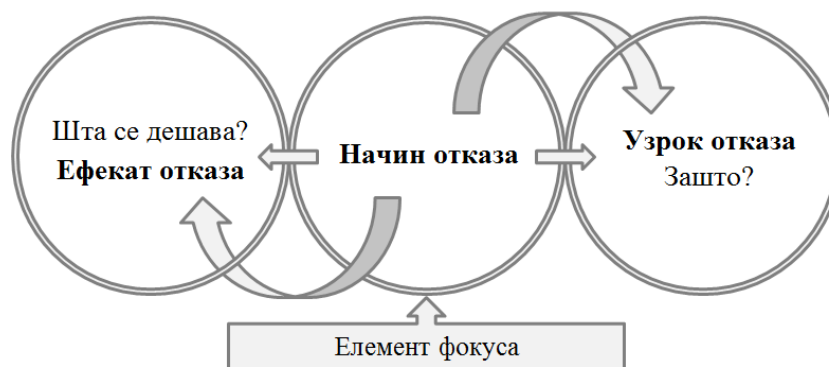
Анализа структуре (корак 2): Корак који се односи на анализу структуре процеса. Другим речима, у овом кораку се процес декомпонује на ставке процеса, кораке процеса и елементе процеса рада. Структура процеса се може представити на различите начине, као на пример помоћу дијаграма тока процеса или помоћу структурног дијаграма (*AIAG&VDA*, 2019).

Под појмом ставка процеса подразумева се производ или процес који се разматра. Корак процеса је заправо у најужем фокусу, када се говори о примени *PFMEA* анализе. Корацима процеса сматрају се производне операције и производне (радне) станице. Елементи процеса рада су категорије потенцијалних узрока појаве начина отказа. Број ових категорија се може разликовати у зависности од предузећа.

Елементи процеса рада представљају се најчешће помоћу Ишикава дијаграма, односно помоћу различитих Ишикава модела, као што су *4M*, *5M*, *6M* итд. Примера ради, *4M* приступ препознаје четири категорије узрока појаве отказа, односно четири најважнија елемента процеса рада, а то су: 1) машина (енгл. *Machine*), 2) човек (енгл. *Man*), 3) материјал (енгл. *Material*) и 4) окружење (енгл. *Environment* или *Milieu*). Често се овим елементима додају и још два елемента, а то су метода (енгл. *Method*) и мерење (енгл. *Measurement*) (AIAG&VDA, 2019).

Анализа функције (корак 3): Сврха овог корака је да идентификује функције и захтеве ставки процеса и корака процеса. Анализа функције је први корак у идентификовању потенцијалних начина отказа, односно потенцијалних начина на који разматрана ставка или разматрани процес не извршавају предвиђену функцију. Свакој ставки процеса или кораку процеса може се придружити једна или више функција (AIAG&VDA, 2019).

Анализа отказа (корак 4): Основни циљ анализе отказа је идентификација свих узрока појаве, начина и ефеката реализације сваког идентификованог отказа. Ова три аспекта представљају елементе тзв. модела ланца отказа (енгл. *Failure Chain Model*), односно три димензије које се придружују сваком потенцијалном отказу (AIAG&VDA, 2019). Модел ланца отказа приказан је на слици 2.8.



Слика 2.8 – Теоријски модел ланца отказа (AIAG&VDA, 2019)

Важно је истаћи да *FMEA Handbook* (AIAG&VDA, 2019) идентификује утицај отказа у три домена, односно утицај на производни погон, на производни погон коме се производ даље испоручује и на крајњег корисника.

Анализа ризика (корак 5): Овај корак се спроводи по сличном принципу као и код традиционалне *FMEA* анализе. Процена вредности фактора ризика *S*, *O* и *D* је заснована на специјално дефинисаним мерним скалама. Основни циљ овог корака је да се одреди приоритет начина отказа. За разлику од традиционалне анализе, у *FMEA Handbook* приручнику је дефинисана нова методологија за одређивање приоритета начина отказа, која се назива „приоритет акција” (енгл. *Action Priority*, скр. *AP*) (AIAG&VDA, 2019).

Оптимизација (корак 6): У овом кораку се прописују мере за редуковање или елиминисање утицаја идентификованих начина отказа. Основни циљ спровођења корака је да се повећа поузданост процеса производње и даље испоруке производа (AIAG&VDA, 2019).

Документовање резултата (корак 7): Као и код традиционалне анализе, у овом кораку се сумирају резултати и представљају у форми *PFMEA* извештаја.

Фактори ризика *S*, *O* и *D*

Нова методологија за процену ризика, односно *AP*, као и *RPN* метод, заснива се на процени вредности три фактора ризика, односно *S*, *O* и *D*. Фактори ризика се процењују независно један од другог, на основу датих упутстава у виду табела (*AIAG&VDA*, 2019).

Када се говори о процени вредности фактора ризика *S*, сматра се да је то вредност која је придружена најозбиљнијем ефекту који може да настане услед реализације разматраног начина отказа. У табели 2.4 дато је, према *FMEA Handbook* приручнику, опште упутство за процену вредности фактора ризика *S* (*AIAG&VDA*, 2019).

Табела 2.4 – Скала мера и упутство за процену озбиљности последице (*S*) према *FMEA Handbook* приручнику (*AIAG&VDA*, 2019)

Општи процес процене озбиљности ефекта (<i>S</i>)				
<i>S</i>	Ефекат	Утицај на производни погон	Утицај на производни погон коме се производ испоручује (када је познат)	Утицај на крајњег корисника (када је познат)
10	Висок	Отказ може да доведе до појаве акутног здравственог и/или безбедносног ризика за радника у производњи или монтажи.	Отказ може да доведе до појаве акутног здравственог и/или безбедносног ризика за радника у производњи или монтажи.	Утицај на безбедан рад возила и/или других возила, здравље возача или путника, других учесника у саобраћају и пешака.
9		Отказ може да доведе до неиспуњења регулаторних прописа у производним погону.	Отказ може да доведе до неиспуњења регулаторних прописа у производном погону.	Непоштовање прописа.
8	Умерено висок	100% произведених производа је потребно одбацити као шкарт. Отказ може да доведе до неиспуњења регулаторних прописа у производним погону или да доведе до појаве хроничног здравственог и/или безбедносног ризика за радника у производњи или монтажи.	Искључење производне линије дуже од једне радне смене; заустављање испоруке; потребна поправка или замена на терену. Отказ може да доведе до неиспуњења регулаторних прописа у производним погону или да доведе до појаве хроничног здравственог и/или безбедносног ризика за радника у производњи или монтажи.	Губитак примарне функције возила неопходне за нормалну вожњу током очекиваног животног циклуса.
7		Производе потребно сортирати, а мање од 100% одстранити (не све); одступање од примарног процеса; смањење брзине производне линије, неопходна додатна радна снага.	Искључење производне линије од једног сата или највише у трајању једне радне смене; заустављање испоруке; потребна поправка или замена на терену.	Непотпуно извршавање примарне функције возила неопходне за нормалну вожњу током очекиваног животног циклуса.

Табела 2.4 (наставак) – Скала мера и упутство за процену озбиљности последице (*S*) према *FMEA Handbook* приручнику (*AIAG&VDA*, 2019)

Општи процес процене озбиљности ефекта (<i>S</i>)				
<i>S</i>	Ефекат	Утицај на производни погон	Утицај на производни погон коме се производ испоручује (када је познат)	Утицај на крајњег корисника (када је познат)
6	Умерено низак	Потребна прерада 100% произведене количине производа, како би производи могли да буду прихваћени.	Искључење производне линије до највише једног сата.	Губитак секундарне функције возила.
5		Део производне серије мора да буде дорађен изван производне линије, како би био прихваћен.	Мање од 100% дефектних производа; велика могућност појаве нових дефектних производа; неопходно сортирање; без искључења производне линије.	Непотпуно извршавање секундарне функције возила.
4		100% производа једне серије је потребно прерадити на улазу у производни процес или пре одређене операције.	Потреба за покретањем озбиљних планова реаговања; без стварања нових дефектних производа; сортирање се не захтева.	Веома неприхватљиви изглед, звук, вибрација, храпавост и сл.
3	Низак	Део производне серије је потребно прерадити на улазу у производни процес или пре одређене операције.	Потреба за покретањем мање озбиљних планова реаговања; без стварања нових дефектних производа; сортирање се не захтева.	Умерено неприхватљиви изглед, звук, вибрација, храпавост и сл.
2		Мања сметња за процес, операцију или оператера.	Без потребе за покретањем планова реаговања; без стварања нових дефектних производа; сортирање се не захтева; захтеване повратне информације добављачу.	Мање неприхватљиви изглед, звук, вибрација, храпавост и сл.
1	Веома низак	Није препознат.	Нема осетљивог ефекта или нема ефекта.	Нема осетљивог ефекта.

Фактор ризика *O*, односно учесталост појаве начина отказа, процењује се као вероватноћа/могућност појаве идентификованог узрока начина отказа. Као и *S*, и овај фактор ризика се процењује на основу препорука датих у табели (табела 2.5) (*AIAG&VDA*, 2019).

Табела 2.5 – Скала мера и упутство за процену учесталости појаве начина отказа (*O*) према *FMEA Handbook* приручнику (*AIAG&VDA*, 2019)

Општи процес процене учесталости појаве отказа (<i>O</i>)			
<i>O</i>	Учесталост/могућност реализације узрока отказа	Врста контроле	Утицај превентивне контроле
10	Екстремно висока	Не постоји.	Не постоје превентивне контроле.
9	Веома висока	Праћење понашања.	Превентивне контроле имају веома мали утицај у спречавању појаве отказа.
8			

Табела 2.5 (наставак) – Скала мера и упутство за процену учесталости појаве начина отказа (*O*) према *FMEA Handbook* приручнику (*AIAG&VDA*, 2019)

Општи процес процене учесталости појаве отказа (<i>O</i>)			
<i>O</i>	Учесталост/могућност реализације узрока отказа	Врста контроле	Утицај превентивне контроле
7	Висока	Праћење понашања и техничка контрола.	Превентивне контроле донекле имају утицај у спречавању појаве отказа.
6			
5	Средња		Превентивне контроле имају умерен утицај у спречавању појаве отказа.
4			
3	Ниска	Најбоља пракса: Праћење понашања или техничка контрола.	Превентивне контроле имају велики утицај у спречавању појаве отказа.
2	Веома ниска		
1	Екстремно ниска	Техничка контрола.	Превентивне контроле имају екстремно велики утицај у спречавању појаве отказа.

Могућност детекције начина отказа (*D*) је фактор ризика које се процењује на основу два критеријума, а то су зрелост/развијеност постојећих метода за детекцију и прилике за детекцију (табела 2.6) (*AIAG&VDA*, 2019).

Табела 2.6 – Скала мера и упутство за процену могућности детекције начина отказа (*D*) према *FMEA Handbook* приручнику (*AIAG&VDA*, 2019)

Општи процес процене могућности детекције отказа (<i>D</i>)			
<i>D</i>	Могућност детекције	Зрелост метода за детекцију	Прилика за детекцију
10	Веома ниска	Није утврђена или није позната метода за тестирање или инспекцију.	Начин отказа се не може детектовати или не постоји могућност да се детектује.
9		Веома мала вероватноћа да ће постојећа метода за тестирање или инспекцију детектовати начин отказа.	Начин отказа није једноставно детектовати случајним или спорадичним ревизијама.
8	Ниска	Постојећа метода за тестирање или инспекцију није доказана као ефикасна и поуздана.	Инспекција од стране човека (визуелно, додиром, звуком) или употреба ручног мерења.
7			Машинска детекција (аутоматизована или полу-аутоматизована) или употреба уређаја за мерење, попут координатне мерне машине.
6	Средња	Постојећа метода за тестирање или инспекцију је доказана као ефикасна и поуздана.	Инспекција од стране човека (визуелно, додиром, звуком) или употреба ручног мерења.
5			Машинска детекција (аутоматизована или полу-аутоматизована) или употреба уређаја за мерење, попут координатне мерне машине.

Табела 2.6 (наставак) – Скала мера и упутство за процену могућности детекције начина отказа (*D*) према *FMEA Handbook* приручнику (*AIAG&VDA*, 2019)

Општи процес процене могућности детекције отказа (<i>D</i>)			
<i>D</i>	Могућност детекције	Зрелост метода за детекцију	Прилика за детекцију
4	Висока	Систем је доказан као ефикасан и поуздан. Методе су већ успешно примењиване на исти производни процес и дају добре резултате.	Машинска, аутоматизована метода детекције која детектује начин отказа кроз наредне кораке процеса или ће систем детектовати производ као неусаглашен, а онда ће га као таквог даље пратити до означеног простора за елиминисање. Идентификација дефектног производа се врши кроз више корака процеса.
3			Машинска, аутоматизована метода детекције која детектује начин отказа на лицу места (спречава даљу обраду) или ће систем детектовати производ као неусаглашен, а онда ће га као таквог даље пратити до означеног простора за елиминисање. Идентификација дефектног производа се врши у једном кораку.
2		Постојећа метода за тестирање или инспекцију је доказана као веома ефикасна и поуздана (готово без грешака).	Метода машинске детекције која самостално открива узрок и спречава појаву начина отказа.
1	Веома висока	Начин отказа не може физички оштетити производ или постојеће методе увек детектују начине/узроке отказа.	

Као што се може видети у табелама 2.4, 2.5 и 2.6, аутори приручника су усвојили скалу мера [1-10]. *PFMEA* тиму су дата детаљна појашњења и упутства о томе на који начин треба да процене вредности фактора ризика *S*, *O* и *D*. Важно је напоменути да су табеле приказане у овој дисертацији преведене са енглеског језика, односно језика на ком је написан приручник, стога могу да се јаве извесна одступања у појединим терминима, изразима и фразама. У тренутку писања дисертације, званична верзија приручника на српском језику није била доступна, тј. није била објављена.

Одређивање приоритета помоћу *AP* методе

Приоритет акција је нова методологија за процену ризика, развијена у *FMEA Handbook* приручнику. Настала је са идејом да се елиминишу недостаци *RPN*-а, што се највише односи на релативну важност фактора ризика *S*, *O* и *D*. Као резултат примене *AP* методе одређује се приоритет начина отказа, који се у овом случају назива приоритет акција. Метода разликује три нивоа приоритета акција, а то су: 1) висок приоритет (енгл. *Priority High – H*), 2) средњи приоритет (енгл. *Priority Medium – M*) и 3) низак приоритет (енгл. *Priority Low – L*).

У табели 2.7 приказана је *AP* метода, која се на исти начин и у истом облику користи, како за *PFMEA*, тако и за *DFMEA* анализу (*AIAG&VDA*, 2019).

Табела 2.7 – Приоритет акција (AP) (AIAG&VDA, 2019)

Приоритет акција (AP) за PFMEA						
Ефекат	S	Учесталост/могућност реализације узрока отказа	O	Могућност детекције	D	Приоритет акција (AP)
Веома висок ефекат на производ или производни погон	9-10	Веома висока	8-10	Ниска – Веома ниска	7-10	H
				Средња	5-6	H
				Висока	2-4	H
				Веома висока	1	H
		Висока	6-7	Ниска – Веома ниска	7-10	H
				Средња	5-6	H
				Висока	2-4	H
				Веома висока	1	H
		Средња	4-5	Ниска – Веома ниска	7-10	H
				Средња	5-6	H
				Висока	2-4	H
				Веома висока	1	M
		Ниска	2-3	Ниска – Веома ниска	7-10	H
				Средња	5-6	M
				Висока	2-4	L
				Веома висока	1	L
Веома ниска	1	Веома висока – Веома ниска	1-10	L		
Висок ефекат на производ или производни погон	7-8	Веома висока	8-10	Ниска – Веома ниска	7-10	H
				Средња	5-6	H
				Висока	2-4	H
				Веома висока	1	H
		Висока	6-7	Ниска – Веома ниска	7-10	H
				Средња	5-6	H
				Висока	2-4	H
				Веома висока	1	M
		Средња	4-5	Ниска – Веома ниска	7-10	H
				Средња	5-6	M
				Висока	2-4	M
				Веома висока	1	M
		Ниска	2-3	Ниска – Веома ниска	7-10	M
				Средња	5-6	M
				Висока	2-4	L
				Веома висока	1	L
Веома ниска	1	Веома висока – Веома ниска	1-10	L		
Средњи ефекат на производ или производни погон	4-6	Веома висока	8-10	Ниска – Веома ниска	7-10	H
				Средња	5-6	H
				Висока	2-4	M
				Веома висока	1	M
		Висока	6-7	Ниска – Веома ниска	7-10	M
				Средња	5-6	M
				Висока	2-4	M
				Веома висока	1	L
		Средња	4-5	Ниска – Веома ниска	7-10	M
				Средња	5-6	L
				Висока	2-4	L
				Веома висока	1	L
		Ниска	2-3	Ниска – Веома ниска	7-10	L
				Средња	5-6	L
				Висока	2-4	L
				Веома висока	1	L
Веома ниска	1	Веома висока – Веома ниска	1-10	L		

Табела 2.7 (наставак) – Приоритет акција (AP) (AIAG&VDA, 2019)

Приоритет акција (AP) за PFMEA						
Ефекат	S	Учесталост/могућност реализације узрока отказа	O	Могућност детекције	D	Приоритет акција (AP)
Низак ефекат на производ или производни погон	2-3	Веома висока	8-10	Ниска – Веома ниска	7-10	M
				Средња	5-6	M
				Висока	2-4	L
				Веома висока	1	L
		Висока	6-7	Ниска – Веома ниска	7-10	L
				Средња	5-6	L
				Висока	2-4	L
				Веома висока	1	L
		Средња	4-5	Ниска – Веома ниска	7-10	L
				Средња	5-6	L
				Висока	2-4	L
				Веома висока	1	L
		Ниска	2-3	Ниска – Веома ниска	7-10	L
				Средња	5-6	L
				Висока	2-4	L
				Веома висока	1	L
Веома ниска	1	Веома висока – Веома ниска	1-10	L		
Нема осетљивог ефекта	1	Веома ниска – Веома висока	1-10	Веома висока – Веома ниска	1-10	L

Висок ниво приоритета акција (*H*) захтева од *PFMEA* тима да неизоставно идентификује одговарајућу акцију (меру) за побољшање превентивне контроле и/или начина детекције, односно да образложи и документује због чега су постојеће методе адекватне за разматран начин отказа. Средњи ниво приоритета акција (*M*) захтева од *PFMEA* тима да, уколико је то могуће, идентификује одговарајућу акцију (меру) за побољшање превентивне контроле и/или начина детекције, односно да на основу става руководства предузећа оправда и поткрепи тврдњу због чега су постојеће методе адекватне. Низак ниво приоритета акција (*L*) не захтева од *PFMEA* тима да идентификује мере за побољшање превентивне контроле и/или начина детекције, већ то зависи од одлуке *PFMEA* тима и руководства предузећа. Посебна препорука за *PFMEA* тим и руководство је да добро преиспита и анализира начине отказа за које је процењена вредност фактора ризика *S* једнака 9 или 10, а којима је приоритет акција на нивоу *H* или *M* (AIAG&VDA, 2019).

2.3 МЕТОДЕ ВИШЕАТРИБУТИВНОГ ОДЛУЧИВАЊА

Проблеми попут избора добављача (Kefer и др., 2016; Awasthi, Govindan и Gold, 2018), одређивања оптималног плана производње (Milanović и др., 2020), избора материјала за израду различитих индустријских производа (Emovon и Oghenenyevrovwho, 2020), процене безбедности радног места (Đapan и др., 2015; Gul, 2018), управљања ризиком у домену прехранбене индустрије (Tadić и др., 2014), унапређења квалитета пословних процеса (Nestić и др., 2015) или анализе и оцене карактеристика рачунара и софтвера (Vasović и др., 2017; Puzović и др., 2019), само су неки од оптимизационих задатака који су често предмет анализе, како у инжењерској пракси, тако и у научним истраживањима. Основни циљ решавања оваквих проблема је уштеда новца, времена и других важних ресурса, али и повећање поузданости пословних процеса и производа.

Доносиоци одлука, односно менаџмент предузећа, као и инжењери, у пракси се свакодневно суочавају са овим и сличим проблемима. Како би поступак доношења одлука и проналажење оптималних решења били поједностављени и ефикаснији, развијене су различите методе оптимизације. Ове методе су веома користан алат и свакако су добра подршка у доношењу одлука, без обзира о којој области привреде или науке је реч.

За решавање инжењерских и менаџмент проблема најчешће се користе методе које истовремено разматрају више циљева или критеријума оптимизације. У решавању реалних проблема веома је чест случај да задовољење једног циља/критеријума иде на штету другог и обрнуто. Другим речима, каже се да су овакви циљеви/критеријуми „у сукобу” или да су „противречни”. Методе које се користе за решавање оваквих типова проблема називају се методе вишекритеријумског одлучивања (енгл. *Multi-Criteria Decision-Making*, скр. *MCDM*) (*Odu* и *Charles-Owaba*, 2013). У литератури се ове методе често називају и методама вишекритеријумске оптимизације (*Syan* и *Ramsoobag*, 2019) или вишекритеријумске анализе (*Wang* и др., 2009). У овом контексту се појмови „оптимизација”, „одлучивање” и „анализа” могу сматрати синонимима.

Међу ауторима постоји готово једногласан став о томе да се *MCDM* методе могу поделити у две основне групе, односно на (*Zimmermann*, 2011; *Zavadskas* и др., 2014): 1) методе вишеатрибутивног одлучивања и 2) методе вишециљног одлучивања (енгл. *Multi-Objective Decision Making*, скр. *MODM*). Основна разлика између ове две групе метода огледа се у њиховој примени, односно у типовима проблема које решавају (*Chakhar* и *Mousseau*, 2008; *Odu* и *Charles-Owaba*, 2013; *Sabaei*, *Erkoyuncu* и *Roy*, 2015; *Kumar* и др., 2017):

- *MADM* методе се користе за решавање оптимизационих проблема код којих је простор доношења одлука дискретан, односно ограничен. У овом случају, скуп алтернатива, тј. могућих решења, је унапред одређен, а применом ових метода се бирају најбоље, рангирају или класификују алтернативе.
- *MODM* методе се користе за решавање оптимизационих проблема код којих је простор доношења одлука континуалан. Типични *MODM* проблеми су различити проблеми математичког програмирања са више циљних функција. Код ових метода оптимално решење зависи и од скупа задатих ограничења, која у одређеној мери могу да утичу на задовољење циљне функције.

Карактеристично за *MADM* методе је то да се алтернативе оцењују према успостављеним критеријумима оптимизације. С друге стране, *MODM* методе карактерише оптимизација која се заснива на респектовању више циљних функција. Стога, *Odu* и *Charles-Owaba* (2013) објашњавају да се код *MADM* метода користе термини „критеријуми” и „атрибути, а код *MODM* метода се користи термин „циљеви”.

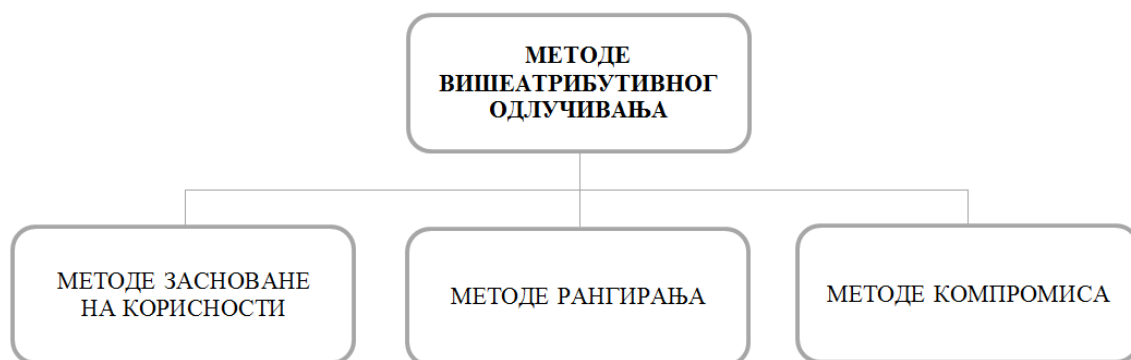
Вишекритеријумско одлучивање је веома важна област математичке и менаџмент дисциплине која се назива „операциона истраживања” (*Ur Rehman* и др., 2012; *Govindan* и *Jepsen*, 2016). *MCDM* се данас користи у решавању различитих оптимизационих проблема и у ту сврху су развијене бројне методе. Оне се могу разликовати према многим карактеристикама, попут математичке основе, врсте проблема које решавају, начина на који се проблем разматра и др. У оквиру дисертације посебна пажња усмерена је на примену метода вишеатрибутивног одлучивања, чије су основне карактеристике, класификација, као и неке од метода ове групе представљене у наставку поглавља.

2.3.1 Класификација метода вишеатрибутивног одлучивања

Основ за класификацију *MADM* метода проистиче из два различита приступа, тачније из две школе – европске (француске) и америчке (*Lootsma*, 1990). Европска школа промовише концепт рангирања скупа разматраних алтернатива (*Lootsma*, 1990; *Zavadskas* и *Turskis*, 2011), док се америчка школа у основи заснива на методама отежавања, чиме се вишедимензионална оптимизација своди на једнодимензионалну (*Valiris*, *Chytas* и *Glykas*, 2005). Карактеристично за европску школу је да субјективне процене доносилаца одлука моделира кроз бинарни систем односа између алтернатива. Са друге стране, америчка школа се заснива на упоредном оцењивању алтернатива према сваком критеријуму посебно, са већим степеном слободе приликом изношења процена, односно већим распоном оцена (*Lootsma*, 1990; *Valiris*, *Chytas* и *Glykas*, 2005). Чак и сама филозофија ова два приступа се изразито разликује. Европска школа има за циљ да доносиоцима одлука олакша процес одлучивања, док америчка школа тежи ка томе да доносиоцима одлука омогући избор оптималне алтернативе (*Lootsma*, 1990).

Метода која се узима као класичан и први представник европске школе је метода „Елиминација и избор за превођење стварности” (франц. *Élimination Et Choix Traduisant la Réalité*, скр. *ELECTRE*). Из тог разлога се оснивачем европске школе сматра *Bernard Roy*, аутор серије *ELECTRE* метода (*Roy*, 1968). Када је реч о америчкој школи, оснивачима се сматрају *Ralph L. Keeney* и *Howard Raiffa*, аутори методе „Вишеатрибутивна теорија корисности” (енгл. *Multi-Attribute Utility Theory*, скр. *MAUT*) (*Keeney* и *Raiffa*, 1976). Ипак, можда и најпознатија метода америчке школе је „Аналитички хијерархијски процес” (енгл. *Analytic Hierarchy Process*, скр. *AHP*), чији је аутор *Thomas L. Saaty* (*Saaty*, 1980). Оно што је заједничко за обе школе јесте да се решење проблема проналази из унапред дефинисаног и коначног скупа алтернатива (*Lootsma*, 1990).

Заснована на разликама између европске и америчке школе, класификација метода вишеатрибутивног одлучивања у литератури је често извршена на следећи начин (*Nijkamp*, *Rietveld* и *Voogd*, 2013): 1) методе засноване на корисности или методе корисности, 2) методе рангирања и 3) мешовите (компромисне) методе. *Duckstein* и др. (1989) су такође на веома сличан начин извршили класификацију *MADM* техника и то на: 1) технике рангирања, 2) технике засноване на дистанцама и 3) технике засноване на вредности или корисности. У релевантној литератури се може пронаћи значајан број радова у којима је подржана оваква подела *MADM* метода (*Danesh*, *Ryan* и *Abbasi*, 2018). На слици 2.9 приказана је основна подела *MADM* метода.



Слика 2.9 – Основна класификација метода вишеатрибутивног одлучивања (изведено на основу (*Duckstein* и др., 1989; *Nijkamp*, *Rietveld* и *Voogd*, 2013; *Danesh*, *Ryan* и *Abbasi*, 2018; *Sousa*, *Almeida* и *Calili*, 2021))

Методе засноване на корисности су класични представници америчке школе. Оно на чему се заснива ова група *MADM* метода јесте могућност „комуницирања” између алтернатива. Другим речима, доносиоцима одлука се даје могућност директног упоређивања алтернатива и то за сваки критеријум независно. Заправо, основно ограничење ове групе метода је њихова примена само у случају када се критеријуми посматрају независно (*Danesh, Ryan и Abbasi, 2018*). Неке од метода заснованих на корисности које се често користе у литератури су (*Sousa, Almeida и Calili, 2021*):

- Аналитички хијерархијски процес (*Saaty, 1980*);
- Аналитички мрежни процес (енгл. *Analytic Network Process*, скр. *ANP*) (*Saaty, 1996*);
- Вишеатрибутивна теорија корисности (енгл. *Multi-Attribute Utility Theory*, скр. *MAUT*) (*Keeney и Raiffa, 1976*);
- Процена адитивног односа (енгл. *Additive Ratio ASsessment*, скр. *ARAS*) (*Zavadskas и Turskis, 2010*);
- Интерактивно и вишекритеријумско одлучивање (порт. *TOmada de Decisão Interativa e Multicritério*, скр. *TODIM*) (*Gomes, 1989*);

Методе засноване на компромису се у литератури најчешће користе за одређивање тежинских коефицијената критеријума, иако је помоћу ових метода могуће одредити и ранг алтернатива.

Методе рангирања су типичан пример метода европске или француске школе. За ову групу метода карактеристично је то да најпре доносиоци одлука процењују вредност сваке алтернативе према сваком разматраном критеријуму, док се као последњи корак примене метода врши поређење алтернатива помоћу бинарног система (*Sadok, 2008*). Методе рангирања које се најчешће користе у литератури су (*Martel и Matarazzo, 2016; Sousa, Almeida и Calili, 2021*):

- *ELECTRE* метода (*Roy, 1968*);
- Организациона метода рангирања приоритета за оцену обogaћења (енгл. *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation*, скр. *PROMETHEE*) (*Brans, Vincke и Mareschal, 1986*);
- Стохастичка вишециљна анализа прихватљивости (енгл. *Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis*, скр. *SMAA*) (*Lahdelma, Hokkanen и Salminen, 1998*);
- *REGIME* метода (*Hinloopen и Nijkamp, 1986*);
- Организација, складиштење и синтеза релационих података (франц. *Organisation, rangement et synthèse de données relationnelles*, скр. *ORESTE*) (*Roubens, 1982*);

Карактеристично за методе рангирања је то да постоји могућност да њихова примена не даје увек јединствен ранг алтернатива. Штавише, неретко се дешава да две или више алтернатива заузимају исто место у рангу. Међутим, то је и основна одлика метода рангирања или метода које потичу из европске школе, јер њихов циљ није да доносиоцима одлука пружи оптимално решење разматраног проблема, већ искључиво да им олакшају процес доношења одлука (*Lootsma, 1990*).

Методe компромиса или методe засноване на дистанцама су трећа група *MADM* метода. Ова група метода заснива се на вредновању и рангирању алтернатива на основу њихових дистанци (удаљења) од идеалног/најбољег решења (*Danesh, Ryan и Abbasi, 2018; Sousa, Almeida и Calili, 2021*). Методe компромиса које се често примењују у литератури су (*Sousa, Almeida и Calili, 2021*):

- Техника за одређивање редоследа преференција на основу сличности са идеалним решењем (енгл. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*, скр. *TOPSIS*) (*Hwang и Yoon, 1981*);
- Вишекритеријумска оптимизација и компромисно решење (скр. *VIKOR*) (*Opricović и Tzeng, 2002*);
- Комплексна пропорционална процена (енгл. *COmplex PROportional ASsessment*, скр. *COPRAS*) (*Zavadskas и Kaklauskas, 1996*);
- Метода најбољи-најлошији (енгл. *Best-Worst Method*, скр. *BWM*) (*Rezaei, 2015*);
- Вишеатрибутивно поређење граница области апроксимације (енгл. *Multi-Attributive Border Approximation area Comparison*, скр. *MABAC*) (*Pamučar и Ćirović, 2015*);

Ова група метода се најчешће користи за рангирање алтернатива, узимајући у обзир и релативне важности критеријума оптимизације. Ипак, постоје и методe попут *BWM* које се у литератури превасходно користе за одређивање тежина, тј. важности/значаја критеријума. Осим представљене три групе *MADM* метода, постоје и методe које није једноставно сврстати само у једну од наведених група или уопште у било коју од група. Разлог за то је њихова некарактеристична математичка основа или комбинација више приступа. Примера ради, такве методe су „Лабораторија за испитивање и вредновање доношења одлука” (енгл. *DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory*, скр. *DEMATEL*), „Отежани агрегирани збир производа процена” (енгл. *Weighted Aggregated Sum Product ASsessment*, скр. *WASPAS*), „Једноставна вишеатрибутивна техника оцењивања” (енгл. *Simple Multi-Attribute Rating Technique*, скр. *SMART*), „Вишеатрибутивна функција вредности” (енгл. *Multi-Attribute Value function*, скр. *MAV*) и друге (*Sousa, Almeida и Calili, 2021*).

2.3.2 Основни поступак примене метода вишеатрибутивног одлучивања

Методe вишеатрибутивног одлучивања, иако се могу разликовати на основу различитих карактеристика, оне имају заједничку основну намену. Заправо, намена *MADM* метода је да од коначног скупа решења доносиоцима одлука пруже увид у то која су решења најпогоднија за разматрани проблем. Доносиоци одлука се у коначном одлучивању не морају придржавати добијених резултата, али им ови резултати могу бити смернице и подршка у доношењу одлука. Треба нагласити и то да многи аутори ове методe поистовећују са методама вишекритеријумског одлучивања (*MCDM*), иако су оне заправо само један од њихова два основна типа.

MADM методе, у општем смислу, могу имати следећу намену (*Triantaphyllou* и др., 1998; *Triantaphyllou*, 2000):

- класификацију алтернатива (могућих решења) на допустиве и недопустиве,
- одређивање релативне важности критеријума на основу којих се оцењују алтернативе (могућа решења) и
- рангирање алтернатива (могућих решења).

Методе које припадају групи *MADM* метода имају заједничке основне елементе. Другим речима, ови елементи су саставни део решавања било код проблема одлучивања применом *MADM* метода. Елементи или основни појмови који су саставни део решавања било ког проблема вишеатрибутивног одлучивања су (*Triantaphyllou* и др., 1998; *Alinezhad* и *Khalili*, 2019):

- алтернативе: унапред позната, ограничена и независна могућа решења,
- критеријуми/атрибути: карактеристике на основу којих се оцењују разматране алтернативе,
- конфликт између атрибута: различити атрибути представљају различите димензије сваке алтернативе и они могу да буду „у сукобу”. На пример, димензија трошкова може да буде у сукобу са квалитетом или профитом.
- матрица одлучивања M : матрица димензија $m \times n$, у којој се представљају алтернативе $i = 1, \dots, m$, критеријуми на основу којих се оцењују алтернативе $j = 1, \dots, n$, као и вредности сваке алтернативе према сваком критеријуму x_{ij} , $i = 1, \dots, m$ и $j = 1, \dots, n$.

$$M = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2n} \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ x_{m1} & x_{m2} & & & & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}$$

- вектор тежине W_j , $j = 1, \dots, n$ (*Yeh*, 2002): означава релативну важност сваког разматраног критеријума K_j , $j = 1, \dots, n$.

Овакав облик матрице одлучивања најчешће је карактеристичан за методе рангирања и методе компромиса. Код метода заснованих на корисности матрица одлучивања се поставља у облику $m \times m$, јер се на тај начин упоређују парови алтернатива према одређеном критеријуму.

Примена *MADM* метода се не заснива искључиво на реализацији корака разматране методе, већ овај поступак захтева адекватну припрему улазних података, упознавање доносилаца одлука са датим проблемом и начином исказивања процена, као и низ других услова које је неопходно испунити како би резултати добијени на овај начин могли да буду веродостојни и корисни (*Zavadskas* и др., 2009).

Поступак примене *MADM* метода подразумева следеће основне кораке (*Malczewski, 1999; Zavadskas* и др., 2009; *Yazdani* и др., 2016):

- дефинисање циљева или скупа циљева које доносиоци одлука (интересне групе) желе да остваре,
- избор доносилаца одлука:
 - један доносилац одлука (индивидуално одлучивање) или
 - скуп доносилаца одлука (групно одлучивање);
- дефинисање алтернатива и критеријума:
 - успостављање скупа алтернатива и критеријума,
 - успостављање система (начина) оцењивања,
 - вредновање алтернатива према разматраним критеријумима и
 - одређивање релативне важности критеријума;
- примена изабране методе:
 - агрегација процена доносилаца одлука (вредности),
 - нормализација вредности матрице одлучивања и
 - примена алгорита (корака) методе;
- прихватање једне (оптималне) или више алтернатива,
- вршење анализе осетљивости и
- у случају неприхватања добијеног решења прикупљају се нове информације и врши се поновна примена *MADM* поступка.

Пре саме примене неке од *MADM* метода, неопходно је дефинисати циљ или скуп циљева које доносиоци одлука имају намеру да остваре. Другим речима, потребно је дефинисати који проблем је неопходно решити. У зависности од проблема који се разматра, циљ може да буде класификација алтернатива, рангирање алтернатива (уз избор оптималне алтернативе), као и одређивање релативне важности критеријума на основу којих се анализирају алтернативе (*Triantaphyllou, 2000*). Осим тога, у припремној фази се дефинише и домен примене методе. Када је јасно дефинисан циљ одлучивања и домен примене неопходно је дефинисати алтернативе, као и критеријуме на основу којих ће бити вршена анализа.

Одређивање квалитета, односно ваљаности алтернатива се врши на основу карактеристика које на најбољи начин описују разматране алтернативе. Дакле, у процесу одлучивања, односно када доносиоци одлука располажу одређеним информацијама о карактеристикама разматраних алтернатива, тада се ове карактеристике називају критеријумима или атрибутима.

Након дефинисања скупа алтернатива и скупа критеријума, неопходно је приступити процени вредности сваке алтернативе према сваком критеријуму. Осим тога, веома често је потребно проценити и релативну важност сваког критеријума. Процене се могу извршити од стране једног или више доносилаца одлука. Другим речима, одлучивање може да буде индивидуално или групно. Основна одлика индивидуалног одлучивања је то да одлуку самостално доноси појединац, што је заправо и основна разлика између ова два типа одлучивања. Приликом индивидуалног доношења одлука, појединац је тај који преузима одговорност и од ког у потпуности зависи исход процеса доношења одлука. Код групног одлучивања, доносиоци одлука деле одговорност, али се и њихова знања и мишљења употпуњују, што је и основна предност групног одлучивања у односу на индивидуално (*Miner, 1984; Castellan, 1993*).

Вредност сваке алтернативе према сваком разматраном критеријуму може да буде описана прецизним или непрецизним бројем. Ако је могуће да се ова вредност одреди мерењем или на основу довољно тачних података из евиденције, тада може да се каже да је могуће вредност критеријума описати вредностима које припадају скупу реалних бројева. У супротном, ако доносиоци одлука не могу на егзактан начин да одреде вредност сваке алтернативе према сваком разматраном критеријуму или ако узорак није репрезентативан, на основу ког се врше статистичке анализе или ако се вредност брзо и непрекидно мења услед деловања разноликих фактора, тада се вредност сваке алтернативе према сваком разматраном критеријуму одређује на основу процена доносилаца одлука. Донносиоци одлука своје процене пресликавају на унапред дефинисану скалу мера, као што је школска скала мера [1-5], скала мера која је дефинисана на интервалу [0,1] или Сатијева (*Saaty*, 1980) скала мера [1-9] (*Komatina, Ljepava и Tadić*, 2018). Прикупљање података који су неопходни како би процес одлучивања био поузданији може се извршити на више начина, као на пример помоћу података из евиденције (коришћењем база података), мерењем, анкетама (интервјуима), бенчмаркингом и сл.

Код групног одлучивања, приликом примене *MADM* метода, доносиоци одлука могу одлуку да донесу консензусом или да се применом неког од оператора њихове одлуке агрегирају у групни консензус. Агрегација процена доносилаца одлука у групни консензус зависи од тога да ли доносиоци одлука имају једнаку или различиту важност при одлучивању. Када доносиоци одлука имају једнаку важност приликом исказивања процена, односно доношења одлука, често се користе методе оператора аритметичке средине, геометријске средине, хармонијске (хармоничне) средине, квадратне средине, кубне средине, медијане, моде и сл. (*Komatina, Ljepava и Tadić*, 2018). Изрази за наведене методе агрегације математички се могу описати на следећи начин (*Detyniecki*, 2001; *Grabisch* и др., 2009):

$$x = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} - \text{аритметичка средина};$$

$$G = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n} - \text{геометријска средина};$$

$$H = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}} - \text{хармонијска средина};$$

$$K = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} - \text{квadratна средина};$$

$$Q = \sqrt[3]{\frac{x_1^3 + x_2^3 + \dots + x_n^3}{n}} - \text{кубна средина};$$

где је x_n процена n -тог доносиоца одлука, док је n укупан број доносилаца одлука.

Медијана представља вредност која се налази на средини неког статистичког узорка (популације), док мода означава вредност која се највише пута појављује у неком статистичком узорку (популацији). Осим наведених метода, за агрегацију процена при истој важности доносилаца одлука користе се и минимум и максимум, квази-аритметичка средина, метод неједнакости између бројевних средина и др. (*Detyniecki*, 2001). У литератури не постоји правило или упутство како изабрати методу агрегације. Генерално говорећи, сматра се да избор методе агрегације зависи од саме природе проблема.

У процесу групног одлучивања јавља се проблем важности доносилаца одлука. Важност доносилаца одлука зависи од хијерархијског нивоа на коме се налазе, искуства и знања које поседују, као и од многих других фактора. Било да се важност доносилаца одлука одређује директном проценом или њиховим међусобним упоређивањем, у појединим случајевима је неопходно узети у обзир важност доносила одлуке при израчунавању агрегиране вредности њихових процена.

Када доносиоци одлука немају једнаку важност при одлучивању, агрегација њихових процена (мишљења) у групни консензус може се извршити, на пример, помоћу Оператора отежане средине (енгл. *Ordered Weighted Averaging*, скр. *OWA*). Метод отежане средине заправо представља проширење аритметичке средине додавањем тежинских коефицијената проценама доносилаца одлука. Код фази приступа, најшире коришћен је Фази оператор отежане средине (енгл. *Fuzzy Ordered Weighted Averaging*, скр. *FOWA*).

Математички се отежана средина може записати на следећи начин (*Detyniecki*, 2001):

$$M_{w_1, \dots, w_n}(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i)$$

где су тежински коефицијенти w_i ненегативни бројеви, где важи услов: $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

OWA оператор (*Yager*, 1993) је превасходно намењен за решавања проблема агрегације процена доносилаца одлука при групном и вишекритеријумском одлучивању. *OWA* оператор се математички може записати као (*Detyniecki*, 2001):

$$OWA(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot x_{\sigma(j)})$$

где је σ пермутација тако да је $x_{\sigma(1)} \leq \dots \leq x_{\sigma(n)}$, тежински коефицијенти ненегативни $w_j \geq 0$ и њихов збир је 1, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

FOWA оператор се уопштено може приказати на сличан начин као и *OWA*, с тим што се у овом случају разматрају фази бројеви. Тако се $FOWA(\tilde{b}_{ij})$ математички може приказати као (*Merigó*, 2011):

$$FOWA(\tilde{b}_{ij}) = \sum_{e=1}^E \tilde{w}_e \cdot \tilde{b}_{ij}^e$$

где је \tilde{w}_e тежина доносилаца одлука e , $e = 1, \dots, E$, док \tilde{b}_{ij} означава процену доносиоца одлука за вредност алтернативе i , $i = 1, \dots, I$ према критеријуму j , $j = 1, \dots, J$.

Агрегација процена доносилаца одлука у групни консензус, при њиховој различитој важности, може се извршити и према још неким методама, као што су: Отежани минимум и отежани максимум, *Choquet* интеграл, *SugeHe* интеграл и сл. Када је реч о фази проценама, још се користе и следеће методе: t -норме и t -конорме, Фази пробабилистички оператор отежане средине (енгл. *Fuzzy Probabilistic Ordered Weighted Averaging*, скр. *FPOWA*) и др. (*Detyniecki*, 2001).

Осим различите важности доносилаца одлука, у *MADM* проблемима веома је чест случај да критеријуми немају једнаку важност. Важност критеријума се може одредити на два начина, односно директном проценом од стране доносилаца одлука или применом неке од метода које се користе у ову сврху. Заправо, у литератури постоји одређени број метода које се користе за решавање проблема израчунавања тежинских фактора (кофицијената) критеријума. Неке од метода овог типа су *AHP* метода (Saaty, 1980), *ANP* метода (Saaty, 1996), *Best-Worst* (Rezaei, 2015) и др.

Према својој природи, критеријуми могу да буду бенефитни (*max*) и трошковни или небенефитни (*min*). Бенефитни тип критеријума се односи на оне критеријуме за које је пожељна што већа вредност атрибута (нпр. квалитет, приход, тражња и др.). Трошковни тип критеријума се односи на оне критеријуме за које је пожељна што мања вредност атрибута (нпр. трошкови, време извршења, удаљеност локација и др.).

Како би било могуће упоређивати вредности алтернатива према различитим критеријумима, чије се вредности често исказују и на различитим скалама мера, различитим начинима моделовања процена и у различитим мерним јединицама, неопходно је извршити нормализацију ових вредности. Поступак нормализације се може дефинисати као пресликавање различитих вредности, изражених у различитим мерним јединицама и на различитим мерним скалама на интервал $[0,1]$, како би њихово упоређивање било могуће.

У литератури постоји велики број поступака нормализације вредности (података), а неки од типова нормализација који се најчешће користе су линеарна, векторска и постотна нормализација (један од типова линеарне нормализације) (Eftekhary и др., 2012). Приликом реализације поступка нормализације у обзир треба узети тип разматраног критеријума чије се вредности нормализују.

Надаље су дати изрази према којима се врши нормализација вредности матрице одлучивања, чији су елементи алтернативе $i, i = 1, \dots, m$ и критеријуми $j, j = 1, \dots, n$ (Chakraborty и Yeh, 2007):

а) Линеарна нормализација (метод максимума)

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_j}$$

за бенефитни тип критеријума и

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\max x_j}$$

за трошковни тип критеријума.

б) Векторска нормализација

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

за бенефитни тип критеријума и

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

за трошковни тип критеријума.

в) Постотна нормализација (метод збира)

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_j}$$

за бенефитни тип критеријума и

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_j}$$

за трошковни тип критеријума.

У претходним изразима r_{ij} означава нормализовану вредност алтернативе $i, i = 1, \dots, m$ према критеријуму $j, j = 1, \dots, n$, x_{ij} означава вредност разматране алтернативе $i, i = 1, \dots, m$ према критеријуму $j, j = 1, \dots, n$ пре нормализације, док x_j означава алтернативе у оквиру разматраног критеријума. Након нормализације вредности критеријума добија се нормализована матрица одлучивања и приступа се примени неке од *MADM* методе.

Избор адекватне методе од великог је значаја за успешно решавање проблема. Дакле, изабрана метода треба да одговара проблему који се решава, а приликом избора методе треба узети у обзир да ли је потребно одабрати једну или више алтернатива, да ли је потребно само класификовати алтернативе на допустиве и недопустиве или извршити рангирање, да ли је неопходно да алтернативе имају јединствен ранг, да ли је разматрана метода у литератури већ коришћена за решавање истих или сродних проблема итд. По потреби, изабрану методу је неопходно модификовати или допунити, у зависности од саме природе проблема. Добијено решење применом изабране методе не треба да буде стриктно усвојено од стране доносилаца одлука, већ да послужи као помоћно средство у одлучивању (*Komatina, Ljepava и Tadić, 2018*).

Након примене изабране *MADM* методе, често се приступа анализи осетљивости. Може се рећи да се анализа осетљивости спроводи са циљем утврђивања конзистентности и поузданости добијених резултата. Један од начина спровођења анализе осетљивости је посматрање промене ранга алтернатива при одређеној промени тежина критеријума (*Yazdani* и др., 2016). *Hashemkhani Zolfani* и др. (2020) истичу да је у неким методама развијена анализа осетљивости, као на пример, у *ANP* методи (*Saaty, 1980*), *ANP* методи (*Saaty, 1996*) или *Best-Worst* методи (*Rezaei, 2015*). Код ових метода се под анализом осетљивости подразумева провера конзистентности. Поред тога, развијени су различити приступи за спровођење анализе осетљивости који су специјално дефинисани за одређене методе или групе метода (*Alinezhad и Amini, 2011; Hashemkhani Zolfani* и др., 2020). Треба нагласити да изабрана метода некад не даје очекиване или довољно добре резултате. Стога, увек се као крајња опција нуди могућност примене неке друге методе и упоређивање и анализа добијених резултата.

2.4 ДОМЕН ПРИМЕНЕ И МЕТОДОЛОШКЕ МОДИФИКАЦИЈЕ FMEA АНАЛИЗЕ

У релевантној литератури се може пронаћи значајан број радова у којима је примењена FMEA анализа или је примењен FMEA оквир за процену ризика. FMEA анализа, иако је превходно карактеристична за аутомобилску индустрију, примењује се и у другим индустријским и привредним секторима, односно у другим научним областима. У зависности од домена примене, аутори су FMEA анализу прилагођавали разматраном проблему и према потреби вршили модификације. Пре свега, то се односи на укључивање нових фактора ризика, дефинисање нових скала мера и начина одређивања приоритета ризика.

У раду (Banduka и др., 2018) аутори предлажу унапређење PFMEA анализе за потребе аутомобилске индустрије. Основни допринос рада је увођење новог приступа, тзв. FSQC-PFMEA, где се фактор ризика озбиљност последице (S) разматра са три аспекта: безбедности, квалитета и трошкова. Осим тога, аутори наведене аспекте посматрају тако да немају исту релативну важност, где се аспект безбедности сматра најважнијим, на другом месту је аспект квалитета, а као најмање важан разматра се аспект трошкова. Такође, важно је нагласити да аутори користе традиционалну FMEA скалу мера [1-10]. За разлику од поменутих аутора, Godina, Silva и Espadinha-Cruz (2021) проширење FMEA анализе за потребе аутомобилске индустрије спроводе кроз њену интеграцију са DMAIC (енгл. Define, Measure, Analyze, Improve and Control) циклусом. Ови аутори користе и TFNs за моделовање вредности фактора ризика S , O и D , као и вредности RPN параметра.

Arabian-Hoseynabadi, Oraee и Tavner (2010) су модификовали FMEA анализу како би је применили у сврху анализе поузданости рада ветротурбина. Аутори су предложили увођење нових скала мера за сва три фактора ризика (S , O и D), где се озбиљност последице оцењује на скали [1-4], учесталост појаве отказа вредностима 1, 2, 3 и 5, а могућност детекције вредностима 1, 4, 7 и 10. На овај начин се у раду предлаже да минимална вредност RPN параметра буде 1, а највећа 200. Оправданост за овакву модификацију методе аутори налазе у типу проблема који се разматра. Другим речима, наводе да је традиционална FMEA скала мера [1-10] исувише великог опсега за разматрани случај.

У раду (Shafiee и Dinmohammadi, 2014) разматран је сличан проблем, односно анализа ризика система ветротурбина, уз упоредну анализу ризика за системе постављене на копну и на мору (приобалне ветротурбине). Аутори рада предлажу увођење CPN (енгл. Cost Priority Number) параметра, који се рачуна као производ три фактора ризика: вероватноће појаве отказа – O , трошковне последице појаве отказа – C и немогућности детекције отказа – D . Фактор ризика O изражава се на интервалу [0,1], C се изражава као збир свих разматраних трошкова, док се D изражава, као и O , на интервалу [0,1]. За сваки фактор ризика аутори су дали математичке формуле и препоруке за израчунавање вредности. Треба нагласити да је овако израчуната вредност CPN параметра континуална, управо због вредности фактора ризика C . Стога, како би резултати били упоредиви са резултатима добијеним помоћу другачијих приступа, као последњи корак анализе, аутори предлажу спровођење неке врсте нормализације CPN параметра.

Осим у наведеним радовима, *FMEA* анализа примењена је за анализу поузданости ветротурбина стационараних уз морску обалу и у радовима (*Li, Teixeira* и *Soares, 2020*; *Li, Diaz* и *Soares, 2021*). Ипак, значајнија методолошка модификација извршена је у раду (*Li, Teixeira* и *Soares, 2020*), кроз укључивање трошковног аспекта и увођење *CRPN* (енгл. *Cost and Risk based Priority Numbers*) параметра. За разлику од овог рада, у раду (*Li, Diaz* и *Soares, 2021*) аутори традиционалну *FMEA* анализу проширују само кроз разматрање релативне важности фактора ризика *S*, *O* и *D*.

У раду (*Li* и *Zeng, 2016*), аутори користе *FMEA* оквир за оцену добављача, у смислу одређивања њихове поузданости. Сваки од четири критеријума, а то су: 1) трошкови, 2) време испоруке, 3) квалитет испоруке и 4) услуга, разматрају се са три аспекта: 1) вероватноће да настане проблем, 2) озбиљности последице услед настанка проблема и 3) могућности да се детектује проблем. Може се рећи да је овај део предложене методологије у потпуној аналогији са традиционалном *FMEA* анализом. За решавање проблема исте категорије, односно категорије избора добављача, аутори рада (*Foroozesh, Tavakkoli-Moghaddam* и *Meysam Mousavi, 2018*) применили су *FMEA* анализу у комбинацији са различитим статистичким алатима и *IT2TFNs*.

Аутори *Vazdani* и др. (2017) применили су *FMEA* анализу за процену ризика у домену животне средине. У раду је представљен модел помоћу кога се оцењује утицај индустријализације и урбанизације на животну средину у разматраним подручјима. Коришћен је класичан *RPN* приступ и три стандардна фактора ризика, с тим што се вредност фактора ризика процењује на скали [1-5]. Након одређивања вредности *RPN*-а, аутори предлажу примену статистичке анализе како би се утврдио укупан ниво ризика.

Процена ризика у реализацији грађевинских пројеката извршена је у раду (*Mohammadi* и *Tavakolan, 2013*). Аутори овог истраживања комбинују *FMEA* анализу и фази приступ, где се вредности фактора ризика процењују помоћу лингвистичких исказа, моделованих троугаоним тип-1 фази бројевима. Фактор ризика озбиљност последице, односно у овом случају утицај ризика на реализацију пројекта, посматра се са четири аспекта: трошкови, време, квалитет и безбедност. Наведени аспекти су разматрани тако да немају једнаку важност.

У табели 2.8 приказан је кратак преглед анализираних радова. Представљена је област примене *FMEA* анализе, коришћена скала мера, као и предложено унапређење методологије са аспекта анализе ризика и одређивања приоритета ризика.

Табела 2.8 – Примена *FMEA* анализе у различитим научним областима

Аутори	Област примене	Скала мера	Методолошка модификација	Израчунавање <i>RPN</i> -а или одређивање приоритета
<i>Banduka</i> и др. (2018)	Аутомобилска индустрија	[1-10]	Увођење аспекта безбедности, квалитета и трошкова при процени озбиљности последице; Аспекти немају једнаку релативну важност.	Класична <i>FMEA</i> скала
<i>Godina, Silva</i> и <i>Espadinha-Cruz</i> (2021)	Аутомобилска индустрија	5 лингвистичких исказа моделованих помоћу троугаоних и трапезоидних тип-1 фази бројева	Интеграција <i>FMEA</i> анализе и <i>DMAIC</i> циклуса	Примена фази <i>IF-THEN</i> правила

Табела 2.8 (наставак) – Примена *FMEA* анализе у различитим научним областима

Аутори	Област примене	Скала мера	Методолошка модификација	Израчунавање <i>RPN</i> -а или одређивање приоритета
<i>Arabian-Hoseynabadi, Oraee и Tavner</i> (2010)	Анализа поузданости ветротурбина	<i>S</i> : [1-4] <i>O</i> : 1, 2, 3 и 5 <i>D</i> : 1, 4, 7 и 10	Модификација скала мера	[1-200]
<i>Shafiee и Dinmohammadi</i> (2014)	Анализа поузданости ветротурбина	<i>O</i> : [0,1] <i>C</i> : неограничена вредност (збир свих трошкова) <i>D</i> : [0,1]	Модификација скала мера; Увођење <i>CPN</i> параметра.	Нормализација резултата како би били упоредиви
<i>Li, Teixeira и Soares</i> (2020)	Анализа поузданости ветротурбина	[1-10]	Интеграција трошковног аспекта	Увођење <i>CRPN</i> параметра.
<i>Li и Zeng</i> (2016)	Оцена добављача	[1-10]	Интеграција фактора ризика традиционалне <i>FMEA</i> анализе у оквир за оцену добављача	Класична <i>FMEA</i> скала
<i>Foroozesh, Tavakkoli-Moghaddam и Meysam Mousavi</i> (2018)	Оцена добављача	7 лингвистичких исказа моделованих помоћу <i>IT2TFNs</i>	Проширење <i>FMEA</i> анализе кроз примену математичке статистике, тј. концепата средње вредности, варијансе и асиметрије	Примена статистичких алата
<i>Vazdani</i> и др. (2017)	Заштита животне средине	[1-5]	Модификације скале мера; Примена додатне статистичке анализе.	[1-125]
(<i>Mohammadi и Tavakolan</i> , 2013)	Процена ризика у реализацији грађевинских пројеката	7 лингвистичких исказа моделованих помоћу троугаоних тип-1 фази бројева	Увођење аспекта трошкова, времена, квалитета и безбедности при процени озбиљности последице; Аспекти немају једнаку релативну важност.	Завршни поступак се своди на опсег класичне <i>FMEA</i> скале

У прерађивачкој индустрији *FMEA* анализа се користи за различите намене. Када се говори о производњи прехранбених производа, *Özilgen* и *Özilgen* (2016) примењују *FMEA* анализу у области примарне обраде хране, док *Trafialek* и *KolaHewski* (2014) анализу примењују као начин за ревизију *HACCP* (енгл. *Hazard Analysis and Critical Control Points*) система. У текстилној индустрији *FMEA* анализа је примењена у радовима (*Mutlu* и *Altuntas*, 2019; *Mohamadinejad* и др., 2019), док је, на пример, *FMEA* анализа у индустрији намештаја примењена у раду (*Ahmad* и др., 2021). Осим тога, у радовима (*Rebello* и *Goyal*, 2010; *Nggada*, 2012; *Park* и др., 2014) аутори *FMEA* анализу примењују за процену ризика код софтвера различитих намена.

Осим у прерађивачкој индустрији, *FMEA* анализа се примењује и за решавање проблема у другим областима привреде. Тако се у раду (*Rah* и др., 2016) *FMEA* анализа користи за процену ризика у домену здравствене заштите. *Hassan, Purnomo* и *Anugerah* (2019) *FMEA* анализу примењују као алат за анализу отказа у грађевинарству, односно на студији случаја спроведеној у складишту цемента, док *Zandi* и др. (2020) ову анализу примењују у области пољопривреде.

Као што је раније поменуто, један од недостатака конвенционалне *FMEA* анализе је предложена процедура за одређивање *RPN* параметра. У литератури могу да се нађу радови у којима су предложени различити поступци за побољшање одређивања вредности *RPN*-а, а самим тим и за побољшање целокупне *FMEA* анализе.

2.5 MADM МЕТОДЕ ПРОШИРЕНЕ СА *IT2FNs*

У литератури се, нарочито последњих неколико година, може пронаћи велики број радова у којима се предлажу приступи у којима се *MADM* методе комбинују са теоријом фази скупова (*Kahraman, Onar* и *Oztaysi, 2015; Stojčić, 2019*). У овој дисертацији је уведена претпоставка да је моделовање неизвесности засновано на *IT2FNs*. Такође, решавање проблема је засновано на примени следећих метода: *IT2FAHP, IT2FBWM, IT2FTOPSIS, IT2FMABAC, IT2FVIKOR*. Стога, надаље је дат преглед литературе у којима су коришћене *MADM* методе проширене са *IT2FSs*.

2.5.1 *IT2FAHP*

На основу истраживања и резултата изнетих у бројним прегледним радовима, може се закључити да је *AHP* једна од чешће примењиваних *MADM* метода у комбинацији са теоријом фази скупова (*Kahraman, Onar* и *Oztaysi, 2015; Kubler* и др., 2016). Осим тога, у одређеном броју радова, аутори су проширење *AHP* методе спровели кроз примену *IT2FNs* (*IT2FAHP*) и методу су применили за решавање различитих оптимizacionих проблема. У табели 2.9 приказани су неки од радова у којима је примењена *IT2FAHP* метода, као и поједине карактеристике њене примене. Анализа приказана у наредној табели заснована је на анализи извршеној у раду (*Komatina* и др., 2022b).

Табела 2.9 – Коришћени *IT2FAHP* приступи у релевантној литератури (преузето и модификовано из (*Komatina* и др., 2022b))

Аутори	Област примене	Тип фази бројева/гранулација	Домен фази бројева	Групно одлучивање/број доносилаца одлука/метод агрегације	Провера конзистентности матрице парова упоређења	Тежине критеријума
<i>Uçal Sarı, Öztaysi</i> и <i>Kahraman</i> (2013)	Избор локације складишта	<i>IT2TrFNs/5</i>	[1-9]	Да/5/Фази геометријска средина	Предложена процедура/ <i>Eigenvector</i> метода (<i>Saaty, 2013</i>)	Фази геометријска средина/ <i>IT2TrFNs</i>
<i>Celik, Gumus</i> и <i>Alegoz</i> (2014)	Менаџмент логистиком	<i>IT2TrFNs/9</i>	[0,1-10]	Да/3/Фази геометријска средина	Не	Фази геометријска средина (<i>Kahraman</i> и др., 2014)/Одређивање <i>crisp</i> вредности тежина према процедури развијеној у раду
<i>Kahraman</i> и др. (2014)	Избор добављача	<i>IT2TFNs</i> и <i>IT2TrFNs/5</i>	[1-9]	Не	Предложена процедура/ <i>Eigenvector</i> метода (<i>Saaty, 2013</i>)	Фази геометријска средина/ <i>IT2TFNs</i>
<i>Cevik Onar, Oztaysi</i> и <i>Kahraman</i> (2014)	Избор управљачког модела предузећа	<i>IT2TrFNs/5</i>	[1-9]	Да/4/Фази геометријска средина	Процедура дефазификације предложена у (<i>Kahraman</i> и др., 2014)/ <i>Eigenvector</i> метода (<i>Saaty, 2013</i>)	Фази геометријска средина/Одређивање <i>crisp</i> вредности тежина према процедури предложеној у (<i>Kahraman</i> и др., 2014)

Табела 2.9 (наставак) – Коришћени *IT2FAHP* приступи у релевантној литератури (преузето и модификовано из (Komatina и др., 2022b))

Аутори	Област примене	Тип фази бројева/гранулација	Домен фази бројева	Групно одлучивање/број доносилаца одлука/метод агрегације	Провера конзистентности матрице парова упоређења	Тежине критеријума
<i>Oztaysi</i> (2015)	Избор пројеката	<i>IT2TrFNs/5</i>	[1-5]	Да/3/Фази геометријска средина	Процедура дефазификације предложена у (<i>Kahraman</i> и др., 2014) / <i>Eigenvector</i> метода (<i>Saaty</i> , 2013)	Фази геометријска средина/ <i>IT2TrFNs</i>
<i>Kilic</i> и <i>Kaya</i> (2015)	Оцена инвестиционих пројеката	<i>IT2TrFNs/5</i>	[1-9]	Да/3/Фази геометријска средина	Предложена процедура дефазификације/ <i>Eigenvector</i> метода (<i>Saaty</i> , 2013)	Фази геометријска средина/ Одређивање <i>crisp</i> вредности тежина према предложеној <i>Centre of area</i> методи
<i>Celik</i> и <i>Gumus</i> (2018)	Логистика хуманитарне помоћи	<i>IT2TrFNs/9</i>	[1-10]	Не	Процедура дефазификације предложена у (<i>Kahraman</i> и др., 2014) / <i>Eigenvector</i> метода (<i>Saaty</i> , 2013)	Фази геометријска средина/ <i>IT2TrFNs</i>
<i>Đurić</i> и др. (2019)	Анализа отказа софтвера	<i>IT2TrFNs/3</i>	[1-5]	Не	Процедура дефазификације предложена у (<i>Kahraman</i> и др., 2014) / <i>Eigenvector</i> метода (<i>Saaty</i> , 2013)	Фази геометријска средина/ <i>IT2TrFNs</i>
<i>Ayodele</i> и др. (2018)	Избор локације ветропарка	<i>IT2TrFNs/5</i>	[1-9]	Да/5/Фази геометријска средина	Процедура дефазификације предложена у (<i>Kahraman</i> , <i>Uçal Sarý</i> и <i>TuraHeđlu</i> , 2012) / <i>Eigenvector</i> метода (<i>Saaty</i> , 2013)	Фази геометријска средина/ Одређивање <i>crisp</i> вредности тежина према процедури предложеној у (<i>Kahraman</i> , <i>Uçal Sarý</i> и <i>TuraHeđlu</i> , 2012)
<i>Ecer</i> (2022)	Избор добављача	<i>IT2TrFNs/5</i>	[1-9]	Да/3/Фази геометријска средина	Процедура дефазификације предложена у (<i>Kahraman</i> и др., 2014) / <i>Eigenvector</i> метода (<i>Saaty</i> , 2013)	Фази геометријска средина/ Одређивање <i>crisp</i> вредности тежина према процедури предложеној у (<i>Kahraman</i> и др., 2014)

Као што се може видети у табели 2.9, *IT2FAHP* метода се користи за решавање различитих проблема. Пре свега, користи се за решавање проблема избора локација (*Uçal Sarý, Öztayşı и Kahraman, 2013; Ayodele и др., 2018*), избора добављача (*Kahraman и др., 2014; Ecer, 2022*) и оцене пројеката (*Oztaysi, 2015; Kilic и Kaya, 2015*). У великом броју радова заступљено је групно доношење одлука и вршена је агрегација њихових процена. У радовима (*Kahraman и др., 2014; Celik и Gumus, 2018; Đurić и др., 2019*) процес доношења одлука се заснива на процени заснованој на консензусу.

Лингвистички искази су у свим наведеним радовима моделирани помоћу *IT2TrFNs*, док је у раду (*Kahraman и др., 2014*) модел тестиран и уз коришћење *IT2TFNs*. Број лингвистичких исказа којима се описују разматране неизвесности зависи од процене доносилаца одлука, као и од природе проблема. У највећем броју анализираних радова доносиоци одлука користе пет лингвистичких исказа.

У литератури не постоји препорука како изабрати интервал на скупу реалних бројева на којем се дефинише домен фази броја. Многи аутори су користили скалу мера [1-9] (*Uçal Sarý, Öztayşı и Kahraman, 2013; Kahraman и др., 2014; Cevik Onar, Oztaysi и Kahraman, 2014; Kilic и Kaya, 2015; Ayodele и др., 2018; Ecer, 2022*), што је и аналогно скали мера конвенционалне *AHP* методе. Неки аутори уводе тзв. школску скалу мера [1-5] (*Oztaysi, 2015; Đurić и др., 2019*). Неки аутори предлажу да је адекватно користити скалу мера [0-10], односно од [0,1-10], да би се задовољио услов да елементи матрице парова упоређења буду реципрочни у односу на главну дијагоналу (*Celik, Gumus и Alegoz, 2014*). *Celik и Gumus (2018)* уводе скалу мера [1-10]. Избор домена фази броја у највећој мери зависи од броја доносилаца одлука, природе проблема, као и од гранулације.

Готово сви аутори претпостављају да процена вредности елемената матрице парова упоређења треба да се постави као задатак групног одлучивања. Агрегација мишљења доносилаца одлука у јединствену оцену је извршена применом фази геометријске средине у свим анализираним радовима где је примењен поступак групног одлучивања. У радовима (*Kahraman и др., 2014; Celik и Gumus, 2018; Đurić и др., 2019*) није коришћен метод агрегације, већ су доносиоци одлука процене исказивали једном вредношћу, односно консензусом.

У готово свим анализираним радовима коришћена је провера конзистентности применом *Eigenvector* методе (*Saaty, 2013*), односно методе сопственог вектора, која је саставни део процедуре конвенционалне *AHP* методе. Пре провере конзистентности аутори свих наведених радова су фази матрицу парова упоређења трансформисали у матрицу парова упоређења, и то најчешће применом поступка дефазификације, дефинисаном у раду (*Kahraman и др., 2014*). У поступку одређивања тежина критеријума, аутори свих анализираних радова користили су поступак фази геометријске средине.

2.5.2 *IT2FBWM*

За разлику од *AHP* методе која је настала пре више од четири деценије, метода *BWM* (*Rezaei, 2015*) је релативно нова и у литератури се не може пронаћи велики број радова у којима су аутори примењивали *BWM*, нарочито у комбинацији са теоријом фази скупова.

Заједничко за *AHP* и *BWM* методу је то да се и једна и друга превасходно користе за одређивање тежина критеријума. Основна разлика између *AHP* и *BWM* методе огледа се у томе што се *AHP* метода често користи и у поступку рангирања алтернатива, док се *BWM* у литератури готово увек користи као алат за одређивање тежина, односно важности критеријума.

У раду (*Rezaei, Wang и Tavasszy, 2015*), аутори су применили *BWM* методу како би одредили релативне важности критеријума и поткритеријума за оцену добављача. На сличан начин, аутори (*Ahmadi, Kusi-Sarpong и Rezaei, 2017*), помоћу *BWM* методе, одређивали су релативну важност критеријума који утичу на одрживост ланаца снабдевања са социјалног аспекта. У оба случаја, аутори су користили *crisp* вредности.

Један од радова у којима је *BWM* коришћена у комбинацији са теоријом фази скупова је (*Moslem и др., 2020*). Аутори овог рада користили су интегрисани приступ *BWM* методе и *TFSs* за оцену фактора понашања возача који утичу на безбедност саобраћаја. Разматрани фактори, који се у овом случају посматрају као критеријуми, анализирани су на три хијерархијска нивоа. *Soner, Celik и Akyuz (2022)* су такође применили *BWM* методу у комбинацији са *TFSs*. Аутори су помоћу оваквог *FBWM* приступа процењивали утицај процеса рециклаже бродова на животну средину. Као саставни део истраживања извршена је упоредна анализа резултата добијених на основу процена од стране пет експерата. Поред наведених радова, у литератури се могу пронаћи и други радови у којима је *BWM* метода комбинована са *FSs* (*Ecer и Pamucar, 2020; Dong, Wan и Chen, 2021; Amiri и др., 2021*).

Поред наведених приступа, *BWM* је у веома малом броју радова коришћена у комбинацији са *IT2FNs*. У табели 2.10. приказана су два рада објављена у релевантним часописима у којима је коришћена *IT2FBWM*.

Табела 2.10 – Коришћени *IT2FBWM* приступи у релевантној литератури

Аутори	Област примене	Тип фази бројева/гранулација	Домен фази бројева	Групно одлучивање/број доносилаца одлука	Провера конзистентности матрице парова упоређења	Тежине критеријума (метод агрегације)
<i>Wu и др. (2019)</i>	Избор добављача	<i>IT2TrFNs</i> (горња функција припадности) и <i>IT2TFNs</i> (доња функција припадности) /9	[1-9]	Да/3	Прилагођена процедура развијена у конвенционалној <i>BWM</i> (<i>Rezaei, 2015</i>)	Агрегација процена доносилаца одлука применом поступка идеалне референтне тачке (енгл. <i>Ideal Reference Point</i> , скр. <i>IRP</i>), који је развијен у овом раду
<i>Celik, Yucesan и Gul (2021)</i>	Избор добављача	<i>IT2TrFNs</i> /9	[1-9]	Да/5	Процедура развијена у (<i>Rezaei, 2015</i>) и прилагођена у (<i>Wu и др., 2019</i>)	Агрегација процена доносилаца одлука применом оператора аритметичке средине

Карактеристично за радове анализирани у табели 2.10 је то да се *IT2FBWM* у оба случаја користи за одређивање тежина критеријума. (*Celik, Yucesanm* и *Gul*, 2021) користе девет *IT2TrFNs* за моделовање унапред дефинисаних лингвистичких исказа. Такође, треба напоменути да су аутори рада (*Wu* и др., 2019) користили специјалан облик интервалних фази бројева типа-2 када је горња функција припадности трапезоидног, а доња функција припадности троугаоног облика. У оба анализирани радова, аутори предлажу уобичајену скалу мера на којој су дефинисани домени *IT2TrFNs*.

Агрегиране вредности матрица парова упоређења су добијене помоћу поступка идеалне референтне тачке у раду (*Wu* и др., 2019), док је у раду (*Celik, Yucesanm* и *Gul*, 2021), у ову сврху, коришћен оператор аритметичке средине. Провера конзистентности у оба рада је извршена применом процедуре која је развијена у конвенционалној *BWM*. Из свега наведеног се може закључити да *IT2FBWM* и даље нема широку примену у литератури, иако је конвенционална метода коришћена за решавање оптимизационих проблема у различитим областима науке.

2.5.3 *IT2FTOPSIS*

Према ауторима бројних прегледних радова (*Kahraman, Onar* и *Oztaysi*, 2015; *Kubler* и др., 2016; *Stojčić*, 2019), *FTOPSIS* је метода која је веома често коришћена у литератури за рангирање алтернатива. Такође, када је у питању *IT2FTOPSIS*, у литератури се може пронаћи одређен број радова у којима се примењује овај приступ. Неки од ових радова приказани су у табели 2.11, а елементи поступка који су анализирани су број, тип и домен фази бројева, начин одређивања фази позитивног идеалног решења (енгл. *fuzzy positive ideal solution*, скр. *FPIS*) и фази негативног идеалног решења (енгл. *fuzzy negative ideal solution*, скр. *FNIS*), начин одређивања дистанци од *FPIS* и *FNIS*, као и начин рангирања алтернатива. Анализа приказана у табели табели 2.11 заснована је на анализи извршеној у раду (*Aleksić* и др., 2019).

Табела 2.11 – Коришћени *IT2FTOPSIS* приступи у релевантној литератури (преузето и модификовано из (*Aleksić* и др., 2019)).

Аутори	Област примене	Број лингвистичких исказа/тип фази бројева/домен	Групно одлучивање/ број доносилаца одлука/метод агрегације	<i>FPIS</i> и <i>FNIS</i>	Дистанце од <i>FPIS</i> и <i>FNIS</i>	Рангирање алтернатива
<i>Chen</i> и <i>Lee</i> (2010)	Избор при запошљавању инжењера; Избор аутомобила	7/ <i>IT2TrFNs</i> / [0-10]	Да/3/Фази аритметичка средина	Рангирање <i>IT2TrFNs</i> (<i>Lee</i> и <i>Chen</i> , 2008)	Нормализована Еуклидова дистанца	Конвенционална <i>TOPSIS</i> метода
<i>Kahraman</i> и <i>Sari</i> (2012)	Процена ризика	7/ <i>IT2TrFNs</i> / [0-10]	Да/3/Фази аритметичка средина	Конвенционална <i>TOPSIS</i> метода	Нормализована Еуклидова дистанца	Конвенционална <i>TOPSIS</i> метода
<i>Temur, Kaça</i> и <i>Kahraman</i> (2014)	Избор локација	7/ <i>IT2TrFNs</i> / [0-1]	Да/4/Фази аритметичка средина	Рангирање <i>IT2TrFNs</i> (<i>Lee</i> и <i>Chen</i> , 2008; <i>Chen</i> и <i>Lee</i> , 2010)	Нормализована Еуклидова дистанца	Конвенционална <i>TOPSIS</i> метода
<i>Zamri</i> и <i>Abdullah</i> (2014)	Избор пројеката	7/ <i>IT2TrFNs</i> / [0-1]	Да/3/ Поступак развијен у раду	Поступак развијен у раду	/	Рангирање <i>IT2TrFNs</i>

Табела 2.11 (наставак) – Коришћени *IT2FTOPSIS* приступи у релевантној литератури (преузето и модификовано из (Aleksić и др., 2019)).

Аутори	Област примене	Број лингвистичких исказа/тип фази бројева/домен	Групно одлучивање/ број доносилаца одлука/метод агрегације	<i>FPIS</i> и <i>FNIS</i>	Дистанце од <i>FPIS</i> и <i>FNIS</i>	Рангирање алтернатива
<i>Aleksić</i> и др. (2019)	Процена ризика	7/ <i>IT2TrFNs</i> / [0-1]	Да/3/Фази метод осредњавања (енгл. <i>fuzzy averaging method</i>)	/	Конвенционална <i>TOPSIS</i> метода и правила фази алгебре	Процедура дефазификације (<i>Kahraman</i> и др., 2014) и конвенционална <i>TOPSIS</i> метода
<i>Kiraci</i> и <i>Akan</i> (2020)	Избор авиона	7/ <i>IT2TrFNs</i> / [0-1]	Да/5/Фази аритметичка средина	Рангирање <i>IT2TrFNs</i> (<i>Lee</i> и <i>Chen</i> , 2008)	Нормализована Еуклидова дистанца	Конвенционална <i>TOPSIS</i> метода
<i>Zhang</i> и др. (2021)	Процена ризика	5/ <i>IT2TFNs</i> / [0-10]	Да/3/ Фази аритметичка средина	Усвајање вредности 0 и 1	Поступак дефинисан у раду	Дефазификација вредности и одређивање нивоа ризика

У табели 2.11 може се видети да је већина аутора у својим истраживањима користила *IT2TrFNs*, као и седам лингвистичких исказа. (*Zhang* и др., 2021) су користили *IT2TFNs*, као и пет лингвистичких исказа. Домени фази бројева у анализираним радовима дефинисани су на интервалу: (а) [1-10] (*Chen* и *Lee*, 2010; *Kahraman* и *Sari*, 2012; *Zhang* и др., 2021) и (б) [0-1] (*Temur*, *Kaya* и *Kahraman*, 2014; *Zamri* и *Abdullah*, 2014; *Aleksić* и др., 2019; *Kiraci* и *Akan*, 2020).

Агрегација процена доносилаца одлука у групни консензус, у већини радова, извршена је применом фази аритметичке средине, осим у раду (*Zamri* и *Abdullah*, 2014), где је агрегација извршена применом новог поступка. Поред тога, у раду *Aleksić* и др. (2019), аутори су као поступак агрегације користили фази метод осредњавања.

FPIS и *FNIS* су одређени као највећа, односно најмања вредност, која је добијена применом поступка рангирања фази бројева (*Chen* и *Lee*, 2010; *Temur*, *Kaya* и *Kahraman*, 2014; *Kiraci* и *Akan*, 2020). У раду (*Kahraman* и *Sari*, 2012) аутори су користили процедуру дефинисану у конвенционалној *TOPSIS* методи, док су *Zamri* и *Abdullah* (2014) развили нови поступак за одређивање *FPIS* и *FNIS*. У раду (*Zhang* и др., 2021) као *FPIS* и *FNIS* усвојене су вредности 1 и 0.

За одређивање дистанци од *FPIS* и *FNIS*, у радовима (*Chen* и *Lee*, 2010; *Kahraman* и *Sari*, 2012; *Temur*, *Kaya* и *Kahraman*, 2014; *Kiraci* и *Akan*, 2020), коришћена је нормализована Еуклидова дистанца. У раду (*Zamri* и *Abdullah*, 2014) аутори нису одређивали дистанце, већ су поступком рангирања фази бројева, на директан начин, одредили ранг алтернатива. *Aleksić* и др. (2019) су користили поступак развијен у конвенционалној *TOPSIS* методи, примењујући правила фази алгебре.

Zhang и др. (2021) су за одређивање дистанци развили нови поступак, као и начин за одређивање нивоа ризика уместо рангирања алтернатива. Аутори (*Chen* и *Lee*, 2010; *Kahraman* и *Sari*, 2012; *Kiraci* и *Akan*, 2020) за рангирање алтернатива применили су процедуру конвенционалне *TOPSIS* методе, док су аутори рада (*Aleksić* и др., 2019) пре примене ове процедуре извршили дефазификацију вредности применом поступка дефинисаног у (*Kahraman* и др., 2014).

2.5.4 *IT2FMABAC*

Метода *MABAC* се, као и *BWM*, може сврстати у групу новијих *MADM* метода. Ова метода се први пут помиње у раду (*Pamućar* и *Ćirović*, 2015) и од тада је своју примену нашла у различитим истраживачким доменима. У релевантној литератури се не може пронаћи велики број радова у којима је ова метода проширена применом *IT2FNs*. Ипак, аутори су *MABAC* методу проширивали применом *FNs* (*Liang* и др., 2019; *Jokić*, *Božanić* и *Pamućar*, 2021), интервалних интуитивних фази бројева (енгл. *Interval-valued intuitionistic fuzzy number(s)*, скр. *IVIFN(s)*) (*Xue* и др., 2016) или интервалних грубих скупова (*Pamućar*, *Stević* и *Zavadskas*, 2018).

У табели 2.12 извршена је анализа два рада у којима су аутори применили *IT2FMABAC* методу, уз осврт на следеће елементе: област примене, тип и домен фази бројева, број лингвистичких исказа, матрицу граничне апроксимације (енгл. *Border approximation area matrix*, скр. *BAA*), одређивање дистанци алтернатива од *BAA* и одређивање припадности алтернатива *BAA*. Анализа приказана у табели заснива се на анализи извршеној у раду (*Komatina* и др., 2022b).

Табела 2.12 – Коришћени *IT2FMABAC* приступи у релевантној литератури (преузето и модификовано из (*Komatina* и др., 2022b))

Аутори	Област примене	Број лингвистичких исказа/тип фази бројева/домен	Групно одлучивање/ број доносилаца одлука/метод агрегације	<i>BAA</i> матрица	Дистанце алтернатива од <i>BAA</i>	Припадност алтернатива <i>BAA</i>
<i>Yu, Wang</i> и <i>Wang</i> (2017)	Избор хотела	7/ <i>IT2TrFNs</i> / [0-1]	Да/3/ Процедура развијена у <i>Chen</i> (2014)	Фази аритметичка средина за <i>IT2FNs</i>	Предложена процедура у раду заснована на вероватноћи <i>IT2TrFNs</i>	Аналогно конвенционалној <i>MABAC</i> методи
<i>Hu, Chen</i> и <i>Yang</i> (2019)	Избор медицинског третмана	9/ <i>IT2TrFNs</i> / [0-1]	Не	Фази геометријска средина за <i>IT2FNs</i>	Предложена нова процедура у раду	Аналогно конвенционалној <i>MABAC</i> методи

У раду (*Yu, Wang* и *Wang*, 2017), *IT2FMABAC* је примењена на проблем избора хотела. Аутори су користили седам лингвистичких исказа, моделованих помоћу *IT2TrFNs*, и то на домену [0-1]. Поступак доношења одлука постављен је као задатак групног одлучивања, где је агрегација процена доносилаца одлука вршена применом поступка који је развијен у раду (*Chen*, 2014). Елементи *BAA* матрице су одређени помоћу оператора фази аритметичке средине, док су дистанце алтернатива од *BAA* одређене на основу поступка дефинисаног у овом раду. Аутори (*Hu, Chen* и *Yang* (2019), за проблем избора адекватног медицинског третмана, користили су фази геометријску средину у поступку формирања *BAA* матрице и предложили су нови приступ за одређивање дистанци. Припадност алтернатива *BAA*, односно поступак рангирања алтернатива, у оба ова рада, извршен је применом поступка дефинисаног у конвенционалној *MABAC* методи.

2.5.5 *IT2FVIKOR*

VIKOR метода, као и *TOPSIS* и *MABAC*, припада групи метода компромиса (*Sousa, Almeida и Calili, 2021*). Ова метода је до сада коришћена за решавање различитих оптимизационих проблема, а може се рећи и да постоји одређени број радова у којима је *VIKOR* метода проширена применом *IT2FNs*. У табели 2.13 анализирани су радови у којима је примењен *IT2FVIKOR* приступ. Анализа приказана у табели заснива се на анализи извршеној у раду (*Aleksić и др., 2023*).

Табела 2.13 – Коришћени *IT2FVIKOR* приступи у релевантној литератури (преузето и модификовано из (*Aleksić и др., 2023*))

Аутори	Област примене	Број лингвистичких исказа/тип фази бројева/домен	Групно одлучивање/број доносилаца одлука/метод агрегације	<i>FPIS</i> и <i>FNIS</i>	Параметар S_i	Параметар Q_i (рангирање алтернатива)
<i>Qin, Liu и Pedrycz (2015)</i>	Процена ризика	7/ <i>IT2TrFN</i> / [0-1]	Да/непознато/ консензус	Према процедури из (<i>Chen и Lee, 2010</i>)	Процедура развијена у раду заснована на процедури из (<i>Yuan и Song, 2013</i>)	Аналогно конвенционалној <i>VIKOR</i> методи
<i>Ghorabae и др. (2015)</i>	Избор пројеката	7/ <i>IT2TrFN</i> / [0-1]	Да/3/Фази аритметичка средина	Дефазификација вредности; Аналогно конвенционалној <i>VIKOR</i> методи	Аналогно конвенционалној <i>VIKOR</i> методи	Аналогно конвенционалној <i>VIKOR</i> методи
<i>Soner, Celik, и Акууз (2017)</i>	Поморски транспорт	7/ <i>IT2TrFN</i> / [0-1]	Да/3/Фази аритметичка средина	Према процедури из (<i>Kuo и Liang, 2012</i>)	Процедура развијена у раду	Аналогно конвенционалној <i>VIKOR</i> методи
<i>Liu, Liu и Qin (2018)</i>	Избор добављача	5/ <i>IT2TrFN</i> / [0-1]	Да/3/Фази геометријска средина	Према процедури из (<i>Chen и Lee, 2010</i>)	Процедура развијена у раду (<i>Qin, Liu и Pedrycz, 2015</i>)	Аналогно конвенционалној <i>VIKOR</i> методи
<i>Wu и др. (2019)</i>	Избор добављача	7/ <i>IT2TrFNs</i> (горња) и <i>IT2TFNs</i> (доња функција припадности)/ [0-10]	Да/3/оператор интервалних тип-2 фази отежаних средина	Према процедури из (<i>Chen и Lee, 2010</i>)	Геометријске дистанце	Аналогно конвенционалној <i>VIKOR</i> методи

Према табели 2.13 може се закључити да су аутори свих наведених радова користили *IT2TrFNs* за описивање неизвесности. У раду (*Wu и др., 2019*) коришћен је *IT2FNs* приступ са различитим облицима горње и доње функције припадности, што је и раније објашњено у овој дисертацији, тачније у делу који се односи на преглед *IT2FBWM*. Готово сви аутори су користили седам лингвистичких исказа за процену вредности атрибута. Само *Liu, Liu и Qin (2018)* предлажу коришћење пет лингвистичких исказа. Домен фази бројева је у готово свим радовима на интервалу [0-1], осим у раду (*Wu и др., 2019*), где је домен фази бројева [0-10].

У свим анализираним радовима проблем је постављен као задатак групног одлучивања. *Qin, Liu* и *Pedrycz* (2015) су применили метод директне процене и у овом случају није познат број доносилаца одлука, нити је примењена било која метода агрегације. Другим речима, процена је донета консензусом. У радовима (*Ghorabae* и др., 2015; *Soner, Celik* и *Akyuz*, 2017) аутори су користили оператор фази аритметичке средине као метод агрегације, док су у раду (*Liu, Liu* и *Qin*, 2018) аутори користили оператор фази геометријске средине. *Wu* и др. (2019) у ову сврху су применили оператор интервалних тип-2 фази отежаних средина.

Одређивање *FPIS* и *FNIS* аутори радова су веома често спроводили према процедури развијеној у раду (*Chen* и *Lee*, 2010). У раду (*Soner, Celik* и *Akyuz*, 2017) овај поступак извршен је према (*Kuo* и *Liang*, 2012). За разлику од свих осталих приступа, *Ghorabae* и др. (2015) су већ у овом кораку извршили дефазификацију вредности и до краја су спровели поступак дефинисан у конвенционалној *VIKOR* методи. За одређивање S_i параметра, аутори су примењивали различите поступке. Одређивање R_i и Q_i , у свим анализираним радовима, извршено је према конвенционалној *VIKOR* методи.

2.6 КОМБИНАЦИЈА *FMEA* АНАЛИЗЕ И *MADM* МЕТОДА

У оквиру овог потпоглавља извршена је анализа радова у којима је *FMEA* анализа коришћена у комбинацији са неким од *MADM* или фази *MADM* приступа. У табели 2.14 приказани су радови, односно домен примене *FMEA*, као и примењена фази *MADM* метода са основним карактеристикама. Такође, анализирани је и начин одређивања приоритета ризика. Анализа радова се ослања на анализу приказану у раду *Komatina* и др. (2022a).

Табела 2.14 – Примена интегрисаног *FMEA* - *MADM* приступа (преузето и модификовано из (*Komatina* и др., 2022a))

Аутори	Вредност фактора ризика (број исказа/тип)	Метода за одређивање релативне важности фактора ризика или аспеката S	Релативна важност фактора ризика (број исказа/тип)	Процес доношења одлука	Аспекти фактора ризика S	Агрегација вредности фактора ризика S	<i>MADM</i> метода/ приоритет ризика
<i>Zammori</i> и <i>Gabrielli</i> (2012)	Класична <i>ANP</i> скала мера	<i>ANP</i>	Класична <i>ANP</i> скала мера	Консензус	Нанета штета, трошкови производње и трошкови одржавања.	Консензус	<i>ANP/RPN</i>
<i>Liu</i> и др. (2015)	Класична <i>ANP</i> скала мера	<i>ANP</i>	Класична <i>ANP</i> скала мера	Консензус	Квалитет	/	<i>VIKOR</i>
<i>Safari, Faraji</i> и <i>Majidian</i> (2016)	<i>5/TFNs</i>	Иста релативна важност	<i>5/TFNs</i>	Фази групно одлучивање	Квалитет	/	<i>FVIKOR</i>
<i>Banduka</i> и др. (2018)	Класична <i>FMEA</i> скала мера [1-10]	<i>FAHP</i>	<i>3/TFNs</i>	Консензус	Безбедност, квалитет и трошкови	<i>OWA</i> оператор	<i>RPN</i>

Табела 2.14 (наставак) – Примена интегрисаног *FMEA - MADM* приступа (преузето и модификовано из (Komatina и др., 2022a))

Аутори	Вредност фактора ризика (број исказа/тип)	Метода за одређивање релативне важности фактора ризика или аспеката <i>S</i>	Релативна важност фактора ризика (број исказа/тип)	Процес доношења одлука	Аспекти фактора ризика <i>S</i>	Агрегација вредности фактора ризика <i>S</i>	<i>MADM</i> метода/ приоритет ризика
Đurić и др. (2019)	7/ <i>IT2TrFNs</i>	<i>FAHP</i>	3/ <i>IT2TrFNs</i>	Консензус	Квалитет	/	<i>COPRAS</i>
Liu, You и Duan (2019)	10/ <i>IVIFNs</i>	Основне форме рангирања и линеарно програмирање	10/ <i>IVIFNs</i>	Консензус	Квалитет	/	<i>IVIF-MABAC</i>
Aleksić и др. (2019)	7/ <i>IT2TrFNs</i>	Фази метод осредњавања и процедура поређења фази бројева	3/ <i>IT2TrFNs</i>	Фази групно одлучивање	Квалитет	/	<i>FTOPSIS</i>
Ghoushchi, Yousefi и Khazaeili (2019)	5/ <i>Z</i> -бројеви	<i>FBWM</i>	6/ <i>TrFNs</i>	Консензус	Квалитет	/	<i>Z-MOORA</i>
Boral и др. (2020)	7/ <i>TFNs</i>	<i>FAHP</i>	9/ <i>TFNs</i>	Фази групно одлучивање	Квалитет	/	<i>FMAIRICA</i>
Banduka и др. (2020)	Класична <i>FMEA</i> скала мера [1-10]	<i>FAHP</i>	5/ <i>IT2TFNs</i>	Консензус	Квалитет	/	<i>Pareto</i> анализа
Başhan, Demirel и Gul (2020)	9/ <i>SVNs</i>	<i>SVN-WAO</i>	5/ <i>SVNs</i>	Фази групно одлучивање	Квалитет	/	<i>SVN-TOPSIS</i>
Zandi и др. (2020)	5/ <i>TFNs</i>	<i>FAHP</i>	5/ <i>TFNs</i>	Консензус	Квалитет, трошкови и време	/	<i>FTOPSIS</i>
Ilbahar, Kahraman и Cebi (2022)	Нормализација вредности процењених на класичној <i>FMEA</i> скали мера [1-10]	<i>IVIFAHP</i>	5/ <i>IVIFNs</i>	Консензус	Квалитет	/	Поступак развијен у раду
Zhu, Ma и Hu (2022)	7/ <i>FRNs</i> (<i>TFNs</i>)	<i>FRAHP</i>	5/ <i>FRNs</i> (<i>TFNs</i>)	Фази групно одлучивање	Квалитет	/	<i>FRVIKOR</i>

Као што је и приказано у табели 2.14, аутори су веома често модификовали *FMEA* анализу применом неке од *MADM* или фази *MADM* метода. У значајном броју радова за одређивање приоритета ризика коришћене су методе компромиса (Liu и др., 2015; Safari, Faraji и Majidian, 2016; Đurić и др., 2019; Liu, You, и Duan, 2019; Aleksić и др., 2019; Başhan, Demirel и Gul, 2020; Zandi и др., 2020). Ипак, за одређивање релативне важности фактора ризика најчешће се примењује *FAHP* метода (Banduka и др., 2018; Đurić и др., 2019; Boral и др., 2020; Banduka и др., 2020; Zandi и др., 2020). Већина аутора сматра да фактори ризика *S*, *O* и *D* немају једнаку важност, док је приступ са једнаким важностима фактора ризика примењен само у (Safari, Faraji и Majidian, 2016).

Осим примене FSs и $IT2FSs$, у последњих неколико година почињу да се примењују и неки други приступи за описивање непрецизности и неизвесности, попут $IVIFNs$ (Liu, You и Duan, 2019; Ilbahar, Kahraman и Cebi, 2022), Z -бројева (Ghoushchi, Yousefi и Khazaeili, 2019), фази грубих бројева (енгл. *Fuzzy Rough Number(s)*, скр. $FRN(s)$) (Zhu, Ma и Hu, 2022) и једнозначних неутрософских скупова (енгл. *Single-valued neutrosophic sets*, скр. $SVN(s)$) (Başhan, Demirel и Gul, 2020). Процена вредности фактора ризика и њихове релативне важности, другим речима, доношење одлука, се веома често врши консензусом, као што је и случај у конвенционалној $FMEA$. Поред тога, постоје и радови у којима се примењује неки од поступака фази групног одлучивања (Safari, Faraji и Majidian, 2016; Aleksić и др., 2019; Boral и др., 2020; Başhan, Demirel и Gul, 2020; Zhu, Ma и Hu, 2022).

Фактор ризика озбиљност последице (S) у већини радова се разматра само са аспекта квалитета, односно као у конвенционалној $FMEA$. У раду Zammori и Gabbrielli (2012), аутори фактор ризика S разматрају са три аспекта, а то су: нанета штета (безбедност и животна средина), трошкови производње (губици у производњи, смањење приноса и смањење квалитета) и трошкови одржавања (трошкови рада и резервни делови). У раду (Banduka и др., 2018) фактор ризика S је разматран са аспекта безбедности, квалитета и трошкова. Аутори су узели у обзир да наведени аспекти немају једнаку важност. За разлику од ових аутора, Zandi и др. (2020), аспекту квалитета и трошкова додају и аспект времена. Важно је нагласити да су овом раду наведени аспекти посматрани као критеријуми, односно на истом хијерархијском нивоу као и сами фактори ризика S , O и D .

3. ОСНОВНА ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА О ПРИМЕЊЕНИМ ОПТИМИЗАЦИОНИМ МЕТОДАМА

Како у инжењерској и менаџмент пракси, тако и у бројним научним дисциплинама, експерти и истраживачи се сусрећу са различитим оптимизационим проблемима. У пракси постоји велики број различитих проблема који захтевају примену неког оптимизационог поступка, а само неки од њих су (*Talbi*, 2009): минимизација времена, трошкова или ризика, односно максимизација профита, квалитета или ефективности. У релевантној литератури могу се пронаћи бројне, а такође и веома сличне дефиниције појма „оптимизација”. *Wright* и *Nocedal* (1999) оптимизацију дефинишу као поступак минимизације или максимизације функције циља, узимајући у обзир ограничења разматраних променљивих. Поред тога, ови аутори истичу да се уместо појма „оптимизација” у литератури често користи и термин „математичко програмирање”. На сличан начин и *Diwekar* (2020) дефинише овај појам, где истиче да је циљ оптимизације одређивање вредности променљивих, како би се оптимизовала вредност функције циља, уз обезбеђење да оптимизациони модел функционише унутар утврђених ограничења.

Класификација оптимизационих метода може се извршити на више начина. Превасходно, оптимизационе методе се могу поделити на две основне групе (*Ezugwu* и др., 2021):

- 1) егзактне оптимизационе методе и
- 2) апроксимативне (хеуристичке) оптимизационе методе.

Као што и сам назив ове две групе метода говори, егзактне методе дају оптимално решење, док апроксимативне методе не гарантују оптимално решење. Најчешће, применом апроксимативних метода добија се приближно оптимално (субоптимално) решење. Такође, важно је нагласити да се егзактне методе користе за решавање проблема мањих димензија, док се апроксимативне методе користе за решавање комплексних проблема, које помоћу егзактних метода не би било могуће решити (*Ezugwu* и др., 2021).

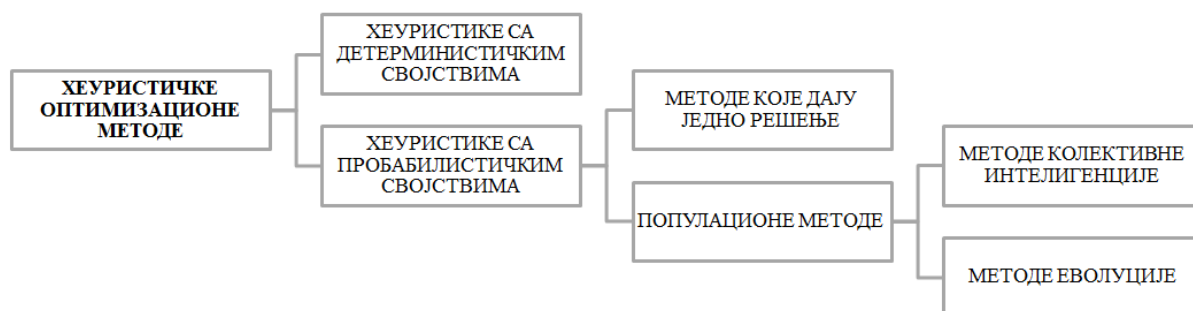
Фокус истраживања у овој дисертацији су апроксимативне, односно хеуристичке оптимизационе методе или хеуристике. Према *Bandaru* и *Deb* (2016), хеуристике су методе које задовољавају следећа три услова: 1) проналазе приближно оптимално решење, 2) немају нужно математички доказ конвергенције и 3) не истражују свако могуће решење у простору претраге пре проналаска коначног решења.

Ezugwu и др. (2021) хеуристичке методе деле у две основне групе:

- 1) хеуристике са детерминистичким и
- 2) хеуристике са пробабилистичким својствима (засноване на вероватноћи).

Као пример хеуристика са детерминистичким својствима могу се издвојити Локало претраживање (енгл. *Local search*) и Табу претраживање (енгл. *Tabu search*). С друге стране, хеуристике са пробабилистичким својствима могу се поделити у две основне групе: 1) методе које дају једно решење и 2) популационе методе. Примери метода које дају једно решење су Симулирано каљење (енгл. *Simulated annealing*) и Итеративна локална претрага (енгл. *Iterated local search*). Популационе методе се даље могу поделити на: 1) методе колективне интелигенције (методе интелигенције роја/крда/јата) и методе еволуције (еволутивни алгоритми).

Као пример метода колективне интелигенције, *Ezugwu* и др. (2021) наводе Оптимизацију ројем честица (енгл. *Particle swarm optimization*) и Оптимизацију колонијом мрава (енгл. *Ant colony optimization*), док се као најпознатија метода еволуције истиче Генетски алгоритам. На слици 3.1 приказана је наведена класификација хеуристичких метода (*Ezugwu* и др., 2021).



Слика 3.1 – Класификација хеуристичких оптимизационих метода на основу њихових својстава (прилагођено из (*Ezugwu* и др., 2021))

Посебна врста хеуристика јесу метахеуристике. Дефинишу се као хеуристике вишег нивоа (*Talbi*, 2009; *Gandomi* и др., 2013; *Dokeroglu* и др., 2019). Према *Sörensen* и *Glover* (2013), метахеуристике су алгоритамски оквири високог нивоа, независни од проблема, који пружају скуп смерница и стратегија за развој хеуристичких алгоритама оптимизације.

У релевантној литератури не постоји потпуно усаглашена дефиниција разлике између хеуристика и метахеуристика, као њихове посебне групе. Ипак, карактеристично је то да многи аутори алгоритме са рандомизацијом и глобалним претраживањем називају метахеуристикама (*Gandomi* и др., 2013).

Метахеуристике се на сличан начин могу класификовати као и хеуристике. *Talbi* (2009) метахеуристике класификује према следећим критеријумима категоризације:

- метахеуристике инспирисане и метахеуристике неинспирисане природом,
- метахеуристике које дају једно решење и популационе метахеуристике,
- метахеуристике које имају меморију (памте) и метахеуристике које не користе меморију,
- детерминистичке и стохастичке метахеуристике и
- итерационе и тзв. „похлепне” или „грамзиве”.

Први аспект класификације односи се на то да ли су метахеуристике инспирисане природним процесима, односно еволутивним процесима, функционисањем имуних система, биолошким процесима и системима, физичким и хемијским појавама и сл. Други аспект класификације разликује метахеуристике које манипулишу једним решењем и трансформишу га током процеса претраге и метахеуристике које развијају популацију решења. Трећи аспект се односи на карактеристике памћења код метахеуристика. Неке метахеуристике памте и издвајају одређене информације, док код осталих метахеуристика не постоји ова димензија (*Talbi*, 2009).

Четврти аспект класификације препознаје детерминистичке и стохастичке метахеуристике. Први приступ се заснива на доношењу детерминистичких одлука, док се други приступ заснива на примени насумичних правила током процеса претраге. Карактеристично за детерминистичке алгоритме је то да ће коришћење једног почетног решења увек довести до истог коначног решења, док се код стохастичких алгоритама претраге из једног почетног решења могу добити различита коначна решења (*Talbi*, 2009).

Према петом аспекту класификације разликују се итеративне и „похлепне” метахеуристике. Код итеративних метахеуристика процес претраге започиње избором, тј. случајним генерисањем почетног решења или популације решења, да би се кроз задат или потребан број итерација ова решења трансформисала, све до постизања приближно оптималног решења. С друге стране, „похлепне” метахеуристике полазе од празног решења, а затим се у сваком кораку претраге додељује променљива одлучивања, све док се не добије потпуно решење. Треба нагласити да већина метахеуристика припада групи итеративних метода (*Talbi*, 2009).

Поред претходно наведене, у литератури постоје и другачије класификације метахеуристичких метода. Примера ради, *Harifi* и др. (2021) све метахеуристике деле у три групе, додајући и четврту, односно групу коју су сами дефинисали и чију су прву методу развили. Класе метахеуристика према овим ауторима су: 1) метахеуристике засноване на еволуцији, 2) метахеуристике засноване на путањи, 3) метахеуристике инспирисане природом и 4) метахеуристике инспирисане антиком (древним цивилизацијама). Ипак, аутори наглашавају да класификација дефинисана у овом раду није јединствена и да у литератури постоје различити приступи. Ова класификација је приказана у табели 3.1, у којој су набројане најважније методе које припадају наведеним класама (*Harifi* и др. 2021).

Табела 3.1 – Класификација метахеуристика према (*Harifi* и др. 2021)

Класа метахеуристика	Методе које припадају класи
Метахеуристике засноване на еволуцији	<ul style="list-style-type: none"> • Генетски алгоритам • Еволуционе стратегије (енгл. <i>Evolutionary strategies</i>) • Еволуционо програмирање (енгл. <i>Evolutionary programming</i>) • Меметички алгоритам (енгл. <i>Memetic algorithm</i>) • Диференцијална еволуција (енгл. <i>Differential evolution</i>) • Хармонијска претрага (енгл. <i>Harmony search</i>) • Алгоритам клонске селекције (енгл. <i>Clonal selection algorithm</i>) • ...
Метахеуристике засноване на путањи	<ul style="list-style-type: none"> • Метода променљивих околина • Симулирано каљење • Табу претраживање • Итеративна локална претрага • Вођена локална претрага (енгл. <i>Guided local search</i>) • Похлепна насумична адаптивна процедура претраге (енгл. <i>Greedy randomized adaptive search procedure</i>) • ...

Табела 3.1 (наставак) – Класификација метахеуристика према (*Harifi* и др. 2021)

Класа метахеуристика	Методe које припадају класи
Метахеуристике инспирисане природом	<ul style="list-style-type: none"> • Метахеуристике засноване на колективној интелигенцији (енгл. <i>Swarm-based</i>); Пример: Оптимизација ројем честица • Метахеуристике инспирисане биологијом (енгл. <i>Bio-inspired</i>); Пример: Оптимизатор сивог вука (енгл. <i>Grey wolf optimizer</i>) • Метахеуристике засноване на физичким/хемијским процесима (енгл. <i>Physics/chemistry-based</i>); Пример: Оптимизација хемијских реакција (енгл. <i>Chemical reaction optimization</i>) • Метахеуристике инспирисане човеком (енгл. <i>Human-based</i>); Пример: Културолошки алгоритам (енгл. <i>Cultural algorithm</i>) • Метахеуристике инспирисане биљкама (енгл. <i>Plant-based</i>); Пример: Инвазивна оптимизација корова (енгл. <i>Invasive weed optimization</i>)
Метахеуристике инспирисане антиком (древним цивилизацијама)	<ul style="list-style-type: none"> • Изградња пирамиде у Гизи (енгл. <i>Giza pyramid construction</i>)

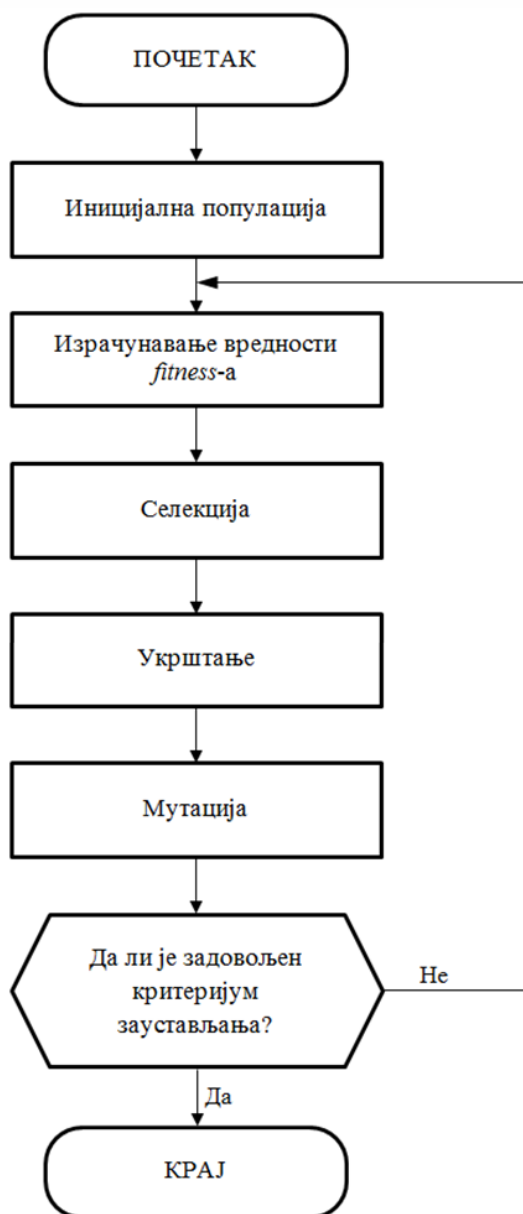
У наставку овог поглавља дате су теоријске основе метахеуристика које су коришћене у овој дисертацији. У потпоглављу 3.1 дате су теоријске основе Генетског алгоритма, док су у поглављу 3.2 дате теоријске основе Методе променљивих околина.

3.1 ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ

Генетски алгоритам је метахеуристичка метода и сврстава се у групу метода заснованих на еволуцији. Теоријске основе методе успоставио је *John Henry Holland* и представио их у књизи под називом „Адаптација у природним и вештачким системима” (енгл. *Adaptation in natural and artificial systems*), објављеној 1975. године (*Holland, 1975*). Иако су пре *Holland*-а поједини аутори радили на успостављању основних принципа алгоритама инспирисаних еволуцијом (видети (*Mitchell, 1998*)), он се сматра изворним аутором ове методе.

Генетски алгоритам је метахеуристика или оптимизациони алгоритам који се заснива на опонашању процеса природне селекције, тј. еволуције. Другим речима, ова метахеуристика је инспирисана природним процесима селекције, укрштања и мутације. Као и свака друга оптимизациона и метахеуристичка метода има за циљ да пронађе приближно оптимално, односно коначно решење, кроз итеративно спровођење наведена три природна процеса, узимајући у обзир задату функцију циља и постављена ограничења.

Као што је већ поменуто, поред тога што припада групи метахеуристика заснованих на еволуцији, Генетски алгоритам се такође сврстава и у групу популационих метахеуристика. Разлог томе је што алгоритам претраге не генерише само једно, већ скуп решења који се назива популација. Свако решење се представља као низ гена и назива се хромозом или јединка. Стога, може да се каже да низ гена чини хромозом, док скуп хромозома чини популацију. За сваки хромозом везује се квантитативна карактеристика која се назива *fitness*. Ова вредност представља вредност функције циља за разматрани хромозом, односно меру задовољења ове функције (*Mathew, 2012*). На слици 3.2 графички је приказан поступак примене основног Генетског алгоритма (*Albadr* и др., 2020).



Слика 3.2 – Поступак примене основног Генетског алгоритма (Albadr и др., 2020)

Поступак спровођења основног Генетског алгоритма започиње генерисањем иницијалне или почетне популације. У овом кораку се на случајан начин дефинише скуп хромозома који чине иницијалну популацију. Поступком селекције бирају се хромозоми који даље учествују у процесу укрштања. Селекција се врши на основу вредности *fitness*-а. Након селекције, укрштањем се генеришу нови хромозоми, односно нова популација. У процесу укрштања се размењују гени између два хромозома, односно јединке (родитељи), и ствара се нова јединка (потомак). У следећем кораку се врши мутација, којом се гени (један или више) једног хромозома замењују генима неког другог хромозома. Мутација се врши на случајан начин. После спровођења процеса селекције, укрштања и мутације, алгоритам испитује да ли је испуњен критеријум за заустављање (време, број итерација, постигнута вредност *fitness*-а и сл.). Уколико је одговор потврдан, генерише се коначно решење. У супротном, процеси селекције, укрштања и мутације се понављају док се коначно не задовољи критеријум заустављања (Albadr и др., 2020).

3.1 МЕТОДА ПРОМЕНЉИВИХ ОКОЛИНА

Метода променљивих околина је представник метахеуристика заснованих на путањи (Harifi и др. 2021). Назив и основни концепт методе се први пут помиње у раду (Mladenović, 1995), док су методолошке основе методе детаљно представљене у раду (Mladenović и Hansen, 1997). Примена методе се заснива на локалној претрази и системској промени околина (суседства), кроз две кључне фазе: фазу спуштања или силаска и фазу размрдавања. Фаза спуштања се спроводи са циљем постизања локалног оптималног решења, док се фаза размрдавања спроводи у циљу изласка из локалне претраге, односно неке околине (Gendreau и Potvin, 2010). На слици 3.3 приказан је поступак примене основне Методе променљивих околина (Araújo Júnior и др., 2018).



Слика 3.3 – Поступак примене основне Методе променљивих околина (Araújo Júnior и др., 2018)

На самом почетку примене Методе променљивих околина дефинише се број околина и типови њихових структура. Након тога, на случајан начин се добија иницијално решење. Поступак локалне претраге се врши за сваку дефинисану околину. Када алгоритам пронађе боље решење након извесног броја итерација, тада се структура околина мења и поново се приступа локалној претрази. Овај поступак се спроводи док се не испитају све разматране структуре околина. Такође, претрага се завршава и када је испуњен један од критеријума заустављања, односно број итерација, време претраге и сл. (*Mladenović* и *Hansen*, 1997; *Araújo Júnior* и др., 2018).

Основно начело на коме се заснива Метода променљивих околина је избегавање „заглављивања” у локалном оптимуму. То се постиже размрдавањем околина. Неке метахеуристике за излазак из локалног оптимума користе приступе попут случајне пертурбације (Итеративна локална претрага), меморијске структуре (Табу претраживање) или укрштања и мутације (еволуциони алгоритми), док се Метода променљивих околина ослања на различите типове околина које потенцијално садрже побољшано решење (*Roshanaei* и др., 2009).

Примена Методе променљивих околина и поступак претраге решења заснива се на три важне чињенице (*Gendreau* и *Potvin*, 2010):

- локални минимум једне околина не мора да буде локални минимум за неку другу,
- глобални минимум је локални минимум за сваку дефинисану околину и
- локални минимума су (код многих проблема) веома близу један другом.

За потребе решавања различитих оптимизационих проблема развијене су и различите варијације Методе променљивих околина. Неке од варијација ове методе су (*Hansen* и др., 2019): Метода променљивог спуста (енгл. *Variable Neighborhood Descent*), Редукована метода променљивих околина (енгл. *Reduced Variable Neighborhood Search*), Адаптивна метода променљивих околина (енгл. *Skewed Variable Neighborhood Search*) и Долине и претрага декомпозиције променљиве околина (енгл. *Valleys and variable neighborhood decomposition search*).

4. ПРЕДЛОЖЕНИ МОДЕЛИ ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНЕ *PFMEA* АНАЛИЗЕ И МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИЈЕ

Примена *PFMEA* анализе у аутомобилској индустрији је веома важна са аспекта обезбеђивања услова да се процес производње реализује према унапред дефинисаним плановима и циљевима. На *PFMEA* анализу не треба гледати само као на обавезну и формалну процедуру коју је неопходно урадити и документовати, већ као на анализу ризика чија је основна намена да процес производње учини довољно поузданим и да њена примена укаже на најважније проблеме који могу да настану током реализације производног процеса.

Традиционална *PFMEA* анализа има фокус на идентификовању и анализи начина отказа у процесу производње. Дакле, помоћу ове анализе се идентификују потенцијални начини отказа, њихови узроци и последице и одређује њихов приоритет. Међутим, као што је већ и речено у овој дисертацији, традиционални приступ има бројне недостатке, а може се рећи и да не препознаје различите факторе који могу да утичу на поузданост процеса производње. Са циљем да се недостаци традиционалне *PFMEA* анализе превазиђу, у овој дисертацији је представљен модификован *PFMEA* приступ, тестиран на студији случаја, реализованој у предузећу које је добављач првог реда у ланцу снабдевања у оквиру аутомобилске индустрије. Резултати истраживања публиковани су кроз рад (Komatina и др., 2022a). Модел представљен у раду приказан је кроз потпоглавље 4.1 у оквиру ове дисертације.

Модел представљен у раду (Komatina и др., 2022a) се заснива на проширењу фактора ризика озбиљности последице (*S*), додавањем два нова аспекта, поред аспекта квалитета, а то су аспект важности производа и аспект трошкова. Применом *IT2FBWM* одређена је релативна важност разматраних аспеката фактора ризика *S*. Приоритет идентификованих начина отказа одређен је применом *AP* методологије (*AIAG&VDA*, 2019).

Друго истраживање представљено у овој дисертацији односи се на примену модификованог *PFMEA* приступа, заснованог на *IT2FBWM* и *IT2FVIKOR* методи. Развијени модел, приказан у потпоглављу 4.2, тестиран је на студији случаја спроведеној у предузећу које је било предмет истраживања и у потпоглављу 4.1, а које је кооперант оригиналног произвођача опреме, односно, глобално гледано, добављач првог реда у ланцу снабдевања. Резултати овог истраживања представљени су у раду (Aleksić и др., 2023).

За разлику од модела предложеног у потпоглављу 4.1, у овом моделу је фактор ризика *S* разматран само са аспекта квалитета и аспекта трошкова. Ипак, ова два аспекта постављена су као два независна фактора ризика који имају различиту важност. Другим речима, аспект трошкова се посматра као посебан фактор ризика, односно критеријум оптимизације. Стога, за разлику од традиционалног *PFMEA* приступа, предложени модел заснован је на одређивању приоритета начина отказа на основу четири критеријума. Применом *IT2FBWM* методе одређена је релативна важност свих разматраних фактора ризика, док је применом *IT2FVIKOR* методе одређен ранг идентификованих начина отказа.

Проблем који може имати значајан утицај на реализацију процеса производње јесте избор добављача. Од поузданости добављача зависи да ли ће производ бити испоручен купцу у предвиђеном временском оквиру и уз захтевани ниво квалитета. Из тог разлога је веома важно одабрати најпоузданије партнере, односно предузећа која треба да буду део јединственог ланца снабдевања. Проблем избора добављача је разматран у бројним радовима, а такође се у релевантној литератури могу пронаћи радови у којима је овај проблем разматран у домену аутомобилске индустрије. У зависности од тога какву позицију предузеће заузима у ланцу снабдевања, коју врсту производа испоручује, на ком тржишту послује, колики је број потенцијалних добављача, какви су захтеви купаца и др., у литератури су развијени различити модели за оцену и избор потенцијалних добављача.

Dweiri и др. (2016) кроз спроведену студију случаја одредили су најважније критеријуме за избор добављача у домену аутомобилске индустрије. Модел на основу ког су извршили анализу критеријума заснован је на *AHP* методи и има за циљ да менаџменту предузећа, која послују у пакистанској аутомобилској индустрији, да увид у то које факторе треба размотрити приликом избора добављача.

У раду (*Jain* и др., 2018) разматран је проблем избора добављача у аутомобилској индустрији у Индији. Аутори сматрају да је овај проблем веома значајан, позивајући се на чињеницу да је индијско тржиште једно од највећих тржишта аутомобилске индустрије у свету, а уз то чак 22% бруто домаћег производа у овој држави долази управо из аутомобилске индустрије (*Jain* и др., 2018). У оквиру овог рада аутори су спровели студију случаја у којој су извршили оцену добављача фарова за аутомобиле. Модел развијен у раду се заснива на интеграцији фази *AHP* и *TOPSIS* методе.

Аутори рада (*Suraraksa* и *Shin*, 2019) истичу да је поред проблема избора добављача важно анализирати и проблем мониторинга добављача. Из тог разлога *Suraraksa* и *Shin* (2019) су представили систематски оквир управљања добављачима, где управо интегришу ова два проблема. Предложени модел је заснован на *AHP* методи, док се спроведена студија случаја односи на аутомобилску индустрију Тајланда.

Када је реч о аутомобилској индустрији у Европи, *Manello* и *Calabrese* (2019) су спровели емпиријску студију како би одредили у којој мери репутација добављача утиче на њихов избор. Аутори предлажу коришћење базе података која садржи информације о уговорима о куповини аутомобилских делова/компонената на тржишту Европе. Применом различитих економетријских приступа, *Manello* и *Calabrese* (2019) су дошли до закључка да репутација има већи значај приликом избора добављача, него што су то неки други критеријуми који се често јављају у литератури. Осим наведених радова, проблем избора добављача у аутомобилској индустрији разматран је и у радовима (*Galankashi, Helmi* и *Hashemzahi*, 2016; *Jiang* и др., 2018; *Gupta, Soni* и *Kumar*, 2019) итд.

У оквиру ове докторске дисертације спроведено је истраживање у сарадњи са предузећем које је оригинални произвођач опреме у ланцу снабдевања у аутомобилској индустрији, чије се седиште налази у централној Србији. Спроведено истраживање представљено је и публиковано кроз рад (*Komatina* и др., 2022b). Предложени модел је приказан у оквиру потпоглавља 4.3 ове дисертације.

Аспект процене ризика који традиционална *PFMEA* само у одређеној мери разматра јесте безбедност и здравље на раду. Нови *AP* приступ такође не разматра овај аспект ризика на довољно добар начин, иако је овај сегмент анализе ипак унапређен и јаснији у односу на традиционални приступ. У малом броју радова, као што су (*Zammori* и *Gabbrielli*, 2012; *Banduka* и др., 2018) аутори су кроз *PFMEA* анализу разматрали и фактор ризика који се односи на безбедност и здравље на раду. У овој дисертацији, као један од елемената унапређења поузданости производног процеса, представљен је модел за побољшање безбедности радног места коришћењем *IT2FMCDM* приступа. Студија случаја је спроведена у предузећу који је добављач првог реда у ланцу снабдевања. Предложени модел је приказан у потпоглављу 4.4 и публикован је кроз рад (*Komatina* и др., 2021).

Проблем одређивања приоритета идентификованих начина отказа се може поставити и као оптимизациони проблем. Другим речима, на основу дефинисане функције циља, као и постављених ограничења, могуће је одредити скуп начина отказа које треба размотрити и за које треба предузети одговарајуће мере, како би се смањило или елиминисао њихов утицај на реализацију процеса производње. У потпоглављу 4.5 представљен је хеуристички модел за одређивање скупа начина отказа који имају највећи утицај на процес производње. Модел је тестиран кроз коришћење две хеуристичке методе, односно Генетског алгорита и Методе променљивих околине. Студија случаја је спроведена на више *PFMEA* извештаја, који потичу из различитих предузећа у ланцу снабдевања. Резултати истраживања публиковани су кроз рад (*Komatina* и др., 2023).

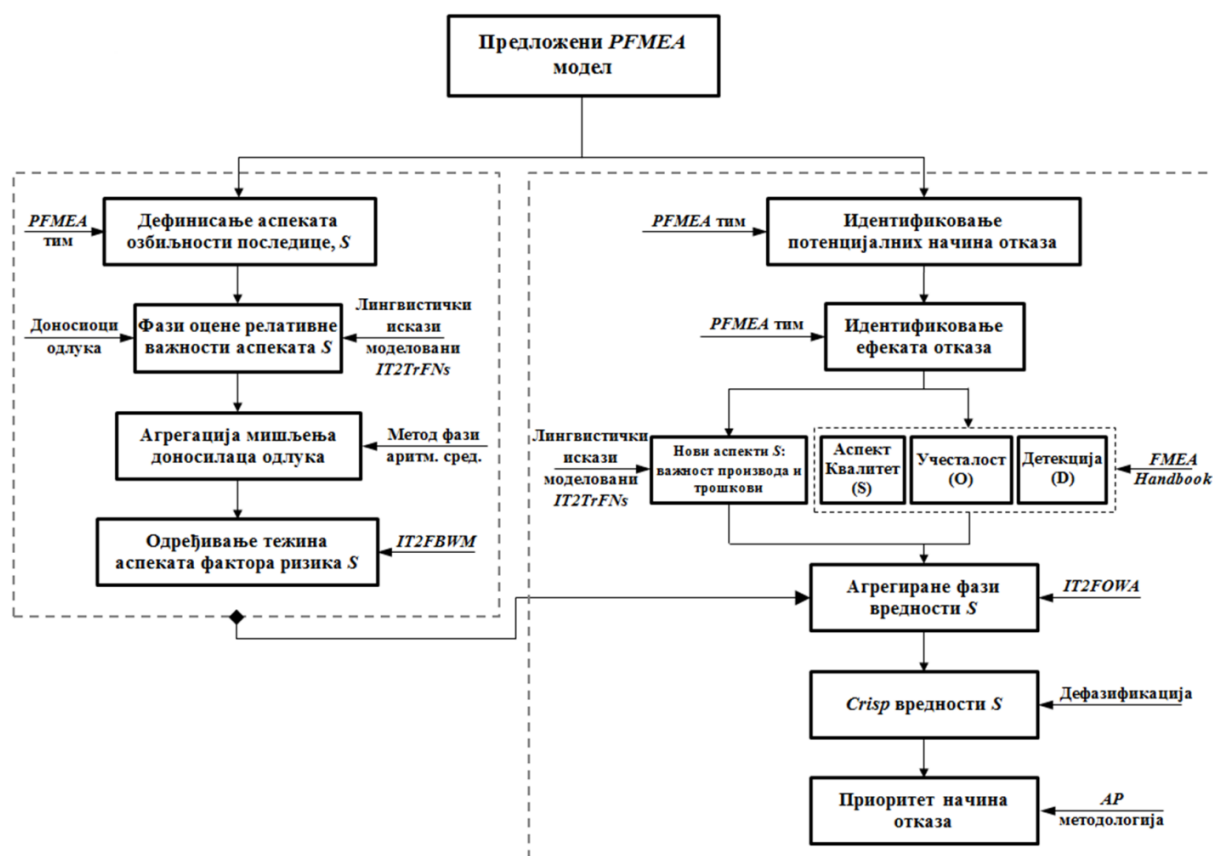
У наставку овог поглавља, односно кроз потпоглавља 4.1 – 4.5, представљени су предложени модели за унапређење процеса производње кроз примену модификоване *PFMEA* анализе и метода оптимизације. Студије случаја, на којима су тестирани предложени модели, приказани су у поглављу 5 ове дисертације, односно кроз потпоглавља 5.1 – 5.5.

Кроз наредна потпоглавља дат је опис сваког разматраног проблема, као и опис коришћене методологије. За сваки предложени модел је приказан начин моделовања неизвесних вредности применом теорије фази скупова.

У моделу дефинисаном у потпоглављу 4.1 коришћени су *IT2TrFNs*, док су у моделима дефинисаним у осталим потпоглављима (4.2 – 4.5) коришћени *IT2TFNs* за моделирање неизвесних вредности. За сваки предложени модел дат је развијени алгоритам, односно поступак примене са поступно дефинисаним корацима.

4.1 МОДИФИКОВАНИ *PFMEA* ПРИСТУП ЗАСНОВАН НА *IT2FBWM* И *AP* МЕТОДОЛОГИЈИ

Многи аутори су указали на недостатке и ограничења традиционалне *FMEA* анализе (*Liu* и др., 2013; *Chang, Chang* и *Lai*, 2014; *Carlson*, 2015; *Lolli* и др., 2015; *Liu*, 2016), као што је претходно и објашњено. У оквиру овог потпоглавља представљен је модификовани *PFMEA* приступ, прилагођен *AP* методологији (*AIAG&VDA*, 2019). Модел који је приказан у наставку овог потпоглавља верификован је кроз публикацију (*Komatina* и др., 2022a). Предложени *PFMEA* модел се може графички приказати сликом 4.1 (*Komatina* и др., 2022a).



Слика 4.1 – Предложени PFMEA модел заснован на IT2FBWM и AP методологији (Komatina и др., 2022a)

Усвојена нотација, која се користи у наставку потпоглавља, може се представити на следећи начин (Komatina и др., 2022a):

E – укупан број доносилаца одлука. У овом случају то су: производни инжењер, инжењер квалитета и супервизор контроле квалитета;

$e, e = 1, \dots, E$ – индекс доносиоца одлука;

I – укупан број начина отказа. Према стандардној PFMEA процедури укупан број начина отказа дефинисан је од стране PFMEA тима предузећа;

$i, i = 1, \dots, I$ – индекс начина отказа;

J – укупан број фактора ризика. Према конвенционалној PFMEA анализи приоритет начина отказа се одређује респектовањем три фактора ризика: озбиљности последице (S), учесталости појаве отказа (O) и могућности детекције (D). Исти случај је и у овом истраживању;

$j, j = 1, \dots, J$ – индекс фактора ризика;

K – укупан број аспеката фактора ризика S . У овом истраживању фактор ризика S се разматра са аспекта квалитета, трошкова и важности производа;

$k, k = 1, \dots, K$ – индекс аспекта фактора ризика S ;

\tilde{A}_B^e – преферентност најбољег аспекта фактора ризика S према осталим, на нивоу доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$;

\tilde{A}_W^e – преферентност сваког аспекта фактора ризика S према најлошијем, на нивоу сваког доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$;

\tilde{A}_B – агрегирана преферентност најбољег аспекта фактора ризика S према осталим;

\tilde{A}_W – агрегирана преферентност сваког аспекта фактора ризика S према најлошијем;

A_B – дефазификована вредност агрегиране преферентности најбољег аспекта фактора ризика S према осталим;

A_W – дефазификована вредност агрегиране преферентности сваког аспекта фактора ризика S према најлошијем;

ω_k – вектор тежина аспеката фактора ризика S ;

\tilde{S}_{ik} – фази процене вредности фактора ризика S са аспекта важности производа и трошкова;

\tilde{S}_i – агрегиране вредности фактора ризика S узимајући у обзир све аспекте;

S_i - репрезентативни скалари \tilde{S}_i ;

4.1.1 Моделовање релативне важности аспеката фактора ризика озбиљност последнице

Релативна важност сваког аспекта фактора ризика S одређује се на основу процене доносилаца одлука, односно чланова менаџмент тима. У овом случају, менаџмент тим који врши процене чине: производни инжењер, инжењер квалитета и супервизор контроле квалитета (*Komatina* и др., 2022a). Своје процене доносиоци одлука исказују помоћу следећих лингвистичких исказа (*Komatina* и др., 2022a):

Једнако важно (R_1) - $((1, 1, 1, 1; 1, 1), (1, 1, 1, 1; 0.75, 0.75))$

Мало важније (R_2) - $((1, 1, 2, 5.5; 1, 1), (1, 1, 2, 5; 0.75, 0.75))$

Умерено важније (R_3) - $((2.5, 4.5, 5.5, 7.5; 1, 1), (3, 4.5, 5.5, 7; 0.75, 0.75))$

Веома важније (R_3) - $((4.5, 8, 9, 9; 1, 1), (5, 8, 9, 9; 0.75, 0.75))$

Домен приказаних *IT2TrFNs* дефинисан је на интервалу [1-9]. У овом случају, вредност 1 означава да је релативна важност k према k' једнака, односно 9 означава да је релативна важност k према k' много већа (*Komatina* и др., 2022a).

4.1.2 Моделовање неизвесних вредности фактора ризика озбиљност последице

У оквиру овог истраживања уведене су следеће претпоставке (*Komatina* и др., 2022а):

- 1) Озбиљност последице S , која може да настане услед реализације начина отказа разматра се са три аспекта: 1) важности производа, 2) квалитета и 3) трошкова.
- 2) Процена вредности фактора ризика S са аспекта квалитета, као и фактора ризика O и D , врши се према скали мера дефинисаној у (*AIAG&VDA*, 2019).
- 3) Приликом процене фактора ризика S са аспекта квалитета, доносиоци одлука узимају у обзир аспект безбедности, па се из тог разлога овај аспект не разматра као посебан, као што је то случај у раду (*Banduka* и др., 2018).

Важност производа и трошкови, као аспекти фактора ризика S , процењени су од стране *PFMEA* тима предузећа. За описивање неизвесности које егзистирају унутар ових аспеката коришћени су *IT2TrFNs*. Домен *IT2TrFNs* налази се на интервалу [1-10], што је аналогно скали мера дефинисаној у (*AIAG&VDA*, 2019). Вредност 1, тј. вредност 10, означава најмању, тј. највећу вредност разматраног аспекта, респективно (*Komatina* и др., 2022а). У табели 4.1 приказани су лингвистички искази моделовани помоћу *IT2TrFNs* који се користе за процену вредности аспекта фактора ризика S (*Komatina* и др., 2022а).

Табела 4.1 – Озбиљност последица које настају услед реализације отказа са аспекта важности производа и трошкова (*Komatina* и др., 2022а)

Лингвистички исказ	<i>IT2TrFNs</i>	Аспект важности производа (опис)	Аспект трошкова (опис)
Готово без утицаја ($S1$)	$\left(\begin{array}{l} (1, 1, 1, 1; 1, 1), \\ (1, 1, 1, 1; 0.85, 0.85) \end{array} \right)$	Производ/купац нема готово никакав утицај на производни процес и/или на пословање предузећа.	Отказ готово да не узрокује трошкове.
Веома низак утицај ($S2$)	$\left(\begin{array}{l} (1, 1, 2, 3.5; 1, 1), \\ (1, 1, 2, 3; 0.85, 0.85) \end{array} \right)$	Производ/купац има занемарљив утицај на производни процес и/или на пословање предузећа.	Отказ се јавља на јефтином производу/делу, који нема велику важност.
Низак утицај ($S3$)	$\left(\begin{array}{l} (1, 2, 3, 4; 1, 1), \\ (1.5, 2, 3, 3.5; 0.85, 0.85) \end{array} \right)$	Купац нема никакав утицај на производни процес и/или на пословање предузећа.	Отказ се јавља на јефтином производу/делу, који је често доступан на тржишту.
Умерено низак утицај ($S4$)	$\left(\begin{array}{l} (2.5, 3.5, 4.5, 5.5; 1, 1), \\ (3, 3.5, 4.5, 5; 0.85, 0.85) \end{array} \right)$	Производ нема никакав утицај на производни процес и/или на пословање предузећа.	Отказ се јавља на јефтином производу/делу, који није увек доступан на тржишту.
Умерен (средњи) утицај ($S5$)	$\left(\begin{array}{l} (4.5, 5.5, 6.5, 7.5; 1, 1), \\ (5, 5.5, 6.5, 7; 0.85, 0.85) \end{array} \right)$	Производ/купац има утицај на производни процес и/или на пословање предузећа, али није од највећег значаја.	Отказ се јавља на средње скупом производу/делу, најчешће доступном на тржишту.

Табела 4.1 (наставак) – Озбиљност последица које настају услед реализације отказа са аспекта важности производа и трошкова (Komatina и др., 2022а)

Лингвистички исказ	$IT2TrFNs$	Аспект важности производа (опис)	Аспект трошкова (опис)
Умерено висок утицај ($S6$)	$\left((6.5, 7.5, 8.5, 9.5; 1, 1), (7, 7.5, 8.5, 9; 0.85, 0.85) \right)$	Производ/купац има висок утицај на производни процес и/или на пословање предузећа и њихови захтеви треба да буду задовољени, али уз дозвољено чекање.	Отказ се јавља на средње скупом производу/делу, ретко доступном на тржишту.
Висок утицај ($S7$)	$\left((7, 8, 9, 10; 1, 1), (7.5, 8, 9, 9.5; 0.85, 0.85) \right)$	Производ/купац има висок утицај на производни процес и/или на пословање предузећа и њихови захтеви треба да буду приоритетно задовољени.	Отказ се јавља на веома скупом производу/делу, али доступном на тржишту.
Веома висок утицај ($S8$)	$\left((7.5, 9, 10, 10; 1, 1), (8, 9, 10, 10; 0.85, 0.85) \right)$	Производ/купац има веома висок утицај на производни процес и/или на пословање предузећа.	Отказ се јавља на веома скупом производу/делу, често недоступном на тржишту.
Екстремно висок утицај ($S9$)	$\left((10, 10, 10, 10; 1, 1), (10, 10, 10, 10; 0.85, 0.85) \right)$	Пословање предузећа је угрожено без производа/купца.	Пословање предузећа је угрожено услед настале материјалне штете.

Агрегација фази вредности аспекта фактора ризика S , у овом истраживању, извршена је применом OWA оператора са $IT2TrFNs$ ($IT2FOWA$). Применом процедуре дефазификације дефинисане у раду (Ayyildiz, Gumus и Erkan, 2020) одређене су *crisp* вредности фактора ризика S на нивоу сваког идентификованог начина отказа $i, i = 1, \dots, I$ (Komatina и др., 2022а).

4.1.3 Предложени алгоритам

Предложени алгоритам се може реализовати кроз надаље приказане кораке (Komatina и др., 2022а):

Корак 1. Примена $IT2FBWM$ за одређивање релативне важности аспекта фактора ризика S . Преферентност најважнијег аспекта фактора ризика S у односу на остале аспекте, као и преферентност свих аспеката фактора ризика S у односу на најмање важан аспект процењује се од стране свих доносилаца одлука, $e, e = 1, \dots, E$. Фази однос најбољег према осталим (енгл. *fuzzy best to others*, скр. FBO), \tilde{A}_B^e и фази однос осталих према најлошијем (енгл. *fuzzy other to worst*, скр. FOW), \tilde{A}_W^e , аспекту фактора ризика S , може да се представи на следећи начин:

$$\tilde{A}_B^e = (\tilde{a}_{B1}^e, \dots, \tilde{a}_{Bk}^e, \dots, \tilde{a}_{BK}^e)$$

$$\tilde{A}_W^e = (\tilde{a}_{1W}^e, \dots, \tilde{a}_{kW}^e, \dots, \tilde{a}_{KW}^e)^T$$

\tilde{a}_{Bk}^e представља преферентност најбољег аспекта фактора ризика S према осталим разматраним аспектима, $k, k = 1, \dots, K$ на нивоу сваког доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$.

\tilde{a}_{kW}^e представља преферентност сваког аспекта фактора ризика S , $k, k = 1, \dots, K$ према најлошијем аспекту на нивоу сваког доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$.

Корак 2. Агрегација фази процена се врши применом оператора фази аритметичке средине:

$$\tilde{a}_{Bk} = \frac{1}{E} \cdot \sum_{e=1, \dots, E} \tilde{a}_{Bk}^e$$

$$\tilde{a}_{kW} = \frac{1}{E} \cdot \sum_{e=1, \dots, E} \tilde{a}_{kW}^e$$

Агрегиране вредности FBO , \tilde{A}_B и FOW , \tilde{A}_W се могу приказати на следећи начин:

$$\tilde{A}_B = (\tilde{a}_{B1}, \dots, \tilde{a}_{Bk}, \dots, \tilde{a}_{BK})$$

$$\tilde{A}_W = (\tilde{a}_{1W}, \dots, \tilde{a}_{kW}, \dots, \tilde{a}_{KW})^T$$

Корак 3. Применом процедуре дефазификације (Karimi, Sadeghi-Dastaki и Javan, 2020) агрегиране вредности FBO и FOW трансформисане су у *crisp* вредности:

$$A_B = (a_{B1}, \dots, a_{Bk}, \dots, a_{BK})$$

$$A_W = (a_{1W}, \dots, a_{kW}, \dots, a_{KW})^T$$

где су:

$$a_{Bk} = \text{defuzz } \tilde{a}_{Bk}$$

$$a_{kW} = \text{defuzz } \tilde{a}_{kW}$$

Корак 4. Одређивање оптималних тежина аспеката фактора ризика S , $(\omega_1^*, \dots, \omega_k^*, \dots, \omega_K^*)$, извршено је према следећем математичком моделу:

Функција циља:

$$\min \max_{j=1, \dots, J} \left\{ \left| \frac{\omega_B}{\omega_k} - a_{Bk} \right|, \left| \frac{\omega_k}{\omega_W} - a_{kW} \right| \right\}$$

при чему важе услови да:

$$\sum_{k=1}^K \omega_k = 1; \quad \omega_k \geq 0, k = 1, \dots, K$$

Приказани математички модел се може трансформисати и представити као проблем линеарног програмирања:

Функција циља:

$$\min \varphi$$

при чему важе услови да:

$$\left| \frac{\omega_B}{\omega_k} - a_{Bk} \right| \leq \varphi, \quad k = 1, \dots, K; \quad \left| \frac{k}{\omega_W} - a_{kW} \right| \leq \varphi, \quad k = 1, \dots, K$$

$$\sum_{k=1}^K \omega_k = 1; \quad \omega_k \geq 0, k = 1, \dots, K$$

Вектори тежина аспеката фактора ризика S означени су као: $(\omega_1, \dots, \omega_k, \dots, \omega_K)$.

Корак 5. Провера конзистентности извршена је према процедури развијеној у раду (Rezaei, 2015).

Корак 6. Процена вредности фактора ризика S са аспекта квалитета, као и осталих фактора ризика (O и D) извршена је од стране чланова *PFMEA* тима, и то према стандардној скали мера, дефинисаној у (AIAG&VDA, 2019).

Корак 7. Фази процене вредности фактора ризика S са аспекта важности производа и трошкова, \tilde{S}_{ik} , $i, i = 1, \dots, I$, $k = 1, 3$, извршене су од стране *PFMEA* тима.

Корак 8. Агрегиране вредности фактора ризика S , узимајући у обзир све аспекте, одређене су применом *IT2FOWA* оператора:

$$\tilde{S}_i = \sum_{k=1}^K \omega_k \cdot \tilde{S}_{ik} \quad ; \quad \text{где је: } i, i = 1, \dots, I; k = 1, 2, 3$$

Корак 9. Репрезентативни скалари \tilde{S}_i , означени као S_i , одређени су помоћу процедуре дефазификације дефинисане у (Ayıldiz, Gumus и Erkan, 2020).

Корак 10. Одређивање приоритета начина отказа извршено је према *AP* методологији (AIAG&VDA, 2019).

4.2 МОДИФИКОВАНИ *PFMEA* ПРИСТУП ЗАСНОВАН НА *IT2FBWM* И *IT2FVIKOR*

У оквиру овог потпоглавља представљен је модификовани *PFMEA* модел заснован на хибридном *IT2FBWM* и *IT2FVIKOR* приступу. За разлику од модела који је приказан у претходном потпоглављу, у коме се приоритет начина отказа одређује кроз примену *AP* методологије, овај модел је заснован на рангирању идентификованих начина отказа применом *IT2FVIKOR* методе. Разматрани модел и студија случаја, представљена у потпоглављу 5.2, публиковани су кроз рад (Aleksić и др., 2023). Графички приказ модела дат је на слици 4.2 (Aleksić и др., 2023).



Слика 4.2 – Предложени PFMEA модел заснован на IT2FBWM и IT2FVIKOR (Aleksić и др., 2023)

Ради лакшег разумевања предложеног модела и у циљу појашњења коришћених израза, усвојена је следећа нотација (Aleksić и др., 2023):

E – укупан број доносилаца одлука. У овом случају су то: менаџер производње, менаџер квалитета, финансијски менаџер, менаџер логистике и менаџер одржавања;

$e, e = 1, \dots, E$ – индекс доносиоца одлука;

I – укупан број начина отказа. Према стандардној PFMEA процедури укупан број начина отказа дефинисан је од стране PFMEA тима предузећа;

$i, i = 1, \dots, I$ – индекс начина отказа;

K – укупан број фактора ризика. У овом случају се разматрају четири фактора ризика: озбиљност последице са аспекта трошкова ($k = 1$), озбиљност последице са аспекта квалитета ($k = 2$), учесталост појаве отказа ($k = 3$) и могућност детекције појаве отказа ($k = 4$);

$k, k = 1, \dots, K$ – индекс фактора ризика;

\tilde{A}_B^e – преферентност најбољег фактора ризика према осталим, на нивоу доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$;

\tilde{A}_W^e – преферентност сваког фактора ризика према најлошијем, на нивоу сваког доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$;

$\tilde{\tilde{A}}_B$ – агрегирана преферентност најбољег фактора ризика према осталим;

$\tilde{\tilde{A}}_W$ – агрегирана преферентност сваког фактора ризика према најлошијем;

ω_k – вектор тежина фактора ризика;

CR – однос конзистентности;

\tilde{x}_{ik} – елемент фази матрице одлучивања;

\tilde{r}_{ik} – елемент нормализоване фази матрице одлучивања;

\tilde{z}_{ik} – елемент отежане нормализоване фази матрице одлучивања;

\tilde{z}_k^+ – фази позитивно идеално решење;

\tilde{z}_k^- – фази негативно идеално решење;

$\tilde{\tilde{S}}_i$ – вредност групне корисности (енгл. *group utility value*);

$\tilde{\tilde{R}}_i$ – вредност индивидуалног одступања (енгл. *individual regret value*);

Q_i – генерални *VIKOR* индекс;

α – коефицијент механизма одлучивања;

4.2.1 Моделовање релативне важности фактора ризика

У оквиру овог истраживања, од доносилаца одлука је захтевано да процене релативну важност фактора ризика коришћењем унапред дефинисаних лингвистичких исказа. За доносиоце одлука одређени су менаџер производње, менаџер квалитета, финансијски менаџер, менаџер логистике и менаџер одржавања (*Aleksić* и др., 2023).

За процену релативне важност фактора ризика коришћено је шест лингвистичких исказа. Ови лингвистички искази су моделовани коришћењем *IT2TFNs* и могу се представити на следећи начин (*Aleksić* и др., 2023):

Једнако важно ($W1$) - $((1, 1, 1; 1), (1, 1, 1; 0.9))$

Веома мало важније ($W2$)- $((1, 2, 3; 1,), (1.5, 2, 2.5; 0.9))$

Мало важније ($W3$) - $((2, 3.5, 5; 1,), (2.5, 3.5, 4.5; 0.9))$

Умерено важније ($W4$) - $((4, 5.5, 7; 1), (4.5, 5.5, 6.5; 0.9))$

Много важније ($W5$) - $((5, 7.5, 9; 1), (5.5, 7.5, 8.5; 0.9))$

Веома много важније ($W6$) - $((7, 9, 9; 1), (7.5, 9, 9; 0.9))$

Домен коришћених $IT2TFNs$ дефинисан је на интервалу [1-9]. Вредност 1 означава да k и k' имају једнаку релативну важност, односно 9 означава да је k веома много важније у односу на k' (Aleksić и др., 2023).

4.2.2 Моделовање неизвесних вредности фактора ризика

Лингвистички искази, коришћени за процену вредности идентификованих начина отказа, према сваком разматраном фактору ризика, моделовани су коришћењем $IT2TFNs$. Приказани лингвистички искази, као и домен фази бројева, дефинисани су у складу са *FMEA Handbook*-ом, односно *AP* методологијом (AIAG & VDA, 2019). У табели 4.2 су приказани лингвистички искази коришћени за процену вредности фактора ризика S и D , односно у табели 4.3 лингвистички искази коришћени за процену вредности фактора ризика O (Aleksić и др., 2023).

Табела 4.2 – Лингвистички искази и одговарајући $IT2TFNs$ коришћени за описивање вредности фактора ризика S и D (Aleksić и др., 2023)

Озбиљност последике, S	Лингвистички искази	Могућност детекције, D
Веома ниска ($V1$)	$((1, 1, 2.5; 1), (1, 1, 2; 0.75))$	Веома висока ($V1$)
Ниска ($V2$)	$((1.5, 3.5, 5.5; 1), (2, 3.5, 5; 0.75))$	Висока ($V2$)
Средње ниска ($V3$)	$((3.5, 5.5, 7.5; 1), (4, 5.5, 7; 0.75))$	Средња ($V3$)
Средње висока ($V4$)	$((5.5, 7.5, 9.5; 1), (6, 7.5, 9; 0.75))$	Ниска ($V4$)
Висока ($V5$)	$((8.5, 10, 10; 1), (9, 10, 10; 0.75))$	Веома ниска ($V5$)

Табела 4.3 – Лингвистички искази и одговарајући $IT2TFNs$ коришћени за описивање вредности фактора ризика O (Aleksić и др., 2023)

Учесталост појаве, O	Lingvistički iskazi
Екстремно ниска ($F1$)	$((1, 1, 2.5; 1), (1, 1, 2; 0.75))$
Веома ниска ($F2$)	$((1, 2.5, 4; 1), (1.5, 2.5, 3.5; 0.75))$
Ниска ($F3$)	$((2, 3.5, 5; 1), (2.5, 3.5, 4.5; 0.75))$
Средња ($F4$)	$((3, 4.5, 6; 1), (3.5, 4.5, 5.5; 0.75))$
Висока ($F5$)	$((5, 6.5, 8; 1), (5.5, 6.5, 7.5; 0.75))$
Веома висока ($F6$)	$((7, 8.5, 10; 1), (7.5, 8.5, 9.5; 0.75))$
Екстремно висока ($F7$)	$((8.5, 10, 10; 1), (9, 10, 10; 0.75))$

Као што се може и видети у табелама 4.2 и 4.3, за дефинисање домена приказаних *IT2TFNs* коришћена је скала мера [1-10]. На овај начин, процес процене прилагођен је стандардној *PFMEA* скали, односно оној која се користи и у *AP* методологији (*AIAG&VDA*, 2019).

4.2.3 Предложени алгоритам

У оквиру истраживања спроведеног у раду (*Aleksić* и др., 2023), предложени алгоритам је подељен на две целине. Најпре су применом *IT2FBWM* одређене тежине фактора ризика, док је након тога извршено рангирање фактора ризика применом *IT2FVIKOR* методе.

Део предложеног алгоритма који се односи на примену *IT2FBWM* методе може се представити на следећи начин (*Aleksić* и др., 2023):

Корак 1. Сваки доносилац одлука процењује релативну важност фактора ризика, коришћењем унапред дефинисаних лингвистичких исказа моделованих помоћу *IT2TFNs*. Фази однос најбољег према осталим, \tilde{A}_B^e и фази однос осталих према најлошијем фактору ризика, \tilde{A}_W^e , може да се представи на следећи начин:

$$\tilde{A}_B^e = (\tilde{a}_{B1}^e, \dots, \tilde{a}_{Bk}^e, \dots, \tilde{a}_{BK}^e)$$

$$\tilde{A}_W^e = (\tilde{a}_{W1}^e, \dots, \tilde{a}_{Wk}^e, \dots, \tilde{a}_{WK}^e)^T$$

где:

\tilde{a}_{Bk}^e представља преферентност најбољег фактора ризика према осталим, $k, k = 1, \dots, K$, на нивоу сваког доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$. У том случају важи да:

$$\tilde{a}_{BB}^e = ((1,1,1; 1), (1,1,1; 1))$$

\tilde{a}_{kW}^e представља преферентност сваког фактора ризика, $k, k = 1, \dots, K$ према најлошијем, на нивоу сваког доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$. У том случају важи да:

$$\tilde{a}_{WW}^e = ((1,1,1; 1), (1,1,1; 1))$$

Корак 2. Агрегација процена доносилаца одлука се врши применом оператора фази геометријске средине:

$$\tilde{a}_{Bk} = \prod_{e=1, \dots, E} \sqrt[E]{\tilde{a}_{Bk}^e} \quad \tilde{a}_{Wk} = \prod_{e=1, \dots, E} \sqrt[E]{\tilde{a}_{Wk}^e}$$

Агрегиране вредности \tilde{A}_B^e и \tilde{A}_W^e формално се могу представити на следећи начин:

$$\tilde{A}_B = (\tilde{a}_{B1}, \dots, \tilde{a}_{Bk}, \dots, \tilde{a}_{BK})$$

$$\tilde{A}_W = (\tilde{a}_{W1}, \dots, \tilde{a}_{Wk}, \dots, \tilde{a}_{WK})^T$$

Корак 3. Одређивање оптималних тежина фактора ризика, $(\tilde{\omega}_1^*, \dots, \tilde{\omega}_k^*, \dots, \tilde{\omega}_K^*)$ извршено је према математичком моделу дефинисаном у (Wu и др., 2019):

Функција циља:

$$\min \max_{1=1, \dots, K} \left\{ \left| \frac{\tilde{\omega}_B}{\tilde{\omega}_k} - \tilde{a}_{Bk} \right|, \left| \frac{\tilde{\omega}_k}{\tilde{\omega}_W} - \tilde{a}_{kW} \right| \right\}$$

при чему важе следећи услови:

$$\text{defuzz} \left(\sum_{k=1}^K \tilde{\omega}_k = 1 \right)$$

$$\omega_{1k}^U \leq \omega_{1k}^L, \quad k = 1, \dots, K$$

$$\omega_{3k}^L \leq \omega_{3k}^U, \quad k = 1, \dots, K$$

$$\omega_{1k}^U \leq \omega_{2k}^U \leq \omega_{3k}^U, \quad k = 1, \dots, K$$

$$\omega_{1k}^L \leq \omega_{2k}^L \leq \omega_{3k}^L, \quad k = 1, \dots, K$$

$$\omega_{1k}^U \geq 0, \quad k = 1, \dots, K$$

Корак 4. Представљени математички модел се може трансформисати и представити као проблем линеарног програмирања:

Функција циља:

$$\min \varphi^*$$

при чему важе следећи услови:

$$|\omega_{Bj}^U - \omega_{jk}^U \cdot a_{Bjk}^U| \leq \varphi^*, \quad j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, K$$

$$|\omega_{jk}^U - \omega_{Wj}^U \cdot a_{Wjk}^U| \leq \varphi^*, \quad j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, K$$

$$|\omega_{Bj}^L - \omega_{jk}^L \cdot a_{Bjk}^L| \leq \varphi^*, \quad j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, K$$

$$|\omega_{jk}^L - \omega_{Wj}^L \cdot a_{Wjk}^L| \leq \varphi^*, \quad j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, K$$

$$\text{COA} \left(\sum_k \tilde{\omega}_k \right), \quad k = 1, \dots, K$$

$$\omega_{1k}^U \leq \omega_{1k}^L, \quad k = 1, \dots, K$$

$$\omega_{3k}^L \leq \omega_{3k}^U, \quad k = 1, \dots, K$$

$$\omega_{1k}^U \leq \omega_{2k}^U \leq \omega_{3k}^U, \quad k = 1, \dots, K$$

$$\omega_{1k}^L \leq \omega_{2k}^L \leq \omega_{3k}^L, \quad k = 1, \dots, K$$

$$\omega_{1k}^U \geq 0, \quad k = 1, \dots, K$$

Функција циља достиже минимум у једном или више врхова полиедра који представља подручје допустивог решења, а које је дефинисано задатком линеарног програмирања. Када је параметар $\tilde{\delta}^*$ описан великом вредношћу, тада простор решења није празан, што имплицира да допустиво подручје постоји. Вектор тежина фактора ризика, $(\tilde{\omega}_1, \dots, \tilde{\omega}_k, \dots, \tilde{\omega}_K)$, одређен је применом постављеног модела.

Корак 5. Провера поузданости постављеног *IT2FBWM* модела. Као што је познато, постизање конзистентности се може остварити задовољењем следећег услова $\tilde{A}_{Bk} \cdot \tilde{A}_{kW} = \tilde{A}_{BW}$. Једначина се може представити на следећи начин:

$$\tilde{\delta}^2 - (\tilde{1} - 2 \cdot \tilde{A}_{BW}) \cdot \tilde{\delta} + (\tilde{A}_{BW}^2 - \tilde{A}_{BW}) = \tilde{0}$$

где су:

$$\tilde{1} = ((1,1,1; 1), (1,1,1; 1)) \text{ и } \tilde{0} = ((0,0,0; 1), (0,0,0; 1))$$

Репрезентативни скалар \tilde{A}_{BW} , тј. A_{BW} , одређен је према (*Karnik и Mendel, 2001*). На тај начин се фази вредност $\tilde{\delta}$ може представити *crisp* вредношћу δ . При овим условима, претходни израз се може трансформисати у:

$$\delta^2 - (1 - 2 \cdot A_{BW}) \cdot \delta + (A_{BW}^2 - A_{BW}) = 0$$

Решавањем претходног израза може се одредити индекс конзистентности, *CI*. Индекс конзистентности представља максималну вредност одступања (девијације) када фази преферентности имају минималну конзистентност. Тада постоје два екстремна случаја. У првом, када је $\delta^* = 0$, тада је вредност одступања минимална. У другом случају, ако је $\delta^* = CI$, тада вредност одступања достиже максимум. Однос конзистентности, *CR*, рачуна се на следећи начин:

$$CR = \frac{\delta^*}{CI}$$

Израчунавањем *CR* проверава се степен конзистентности и поузданости одређених тежина фактора ризика.

Део предложеног алгоритма који се односи на примену *IT2FVIKOR* методе може се представити на следећи начин (*Aleksić и др., 2023*):

Корак 1. Постављање фази матрице одлучивања:

$$[\tilde{x}_{ik}]_{JxK}$$

Елементи фази матрице одлучивања дефинисани су као вредности фактора ризика, $k, k = 1, \dots, K$, за сваки идентификовани начин отказа $i, i = 1, \dots, I$.

Корак 2. Нормализована фази матрица одлучивања конструисана је применом процедуре линеарне нормализације (*Chen, 2013*):

$$[\tilde{r}_{ik}]_{JxK}$$

Корак 3. Отежана нормализована фази матрица одлучивања је постављена на следећи начин:

$$[\tilde{z}_{ik}]_{J \times K}$$

где је:

$$\tilde{z}_{ik} = \tilde{\omega}_k \cdot \tilde{r}_{ik}$$

Вредности \tilde{z}_{ik} , $i = 1, \dots, I$; $k = 1, \dots, K$ представљене су помоћу *IT2TFNs* и израчунате применом правила фази алгебре (*Mendel, 2017*).

Корак 4. Фази позитивно идеално решење, \tilde{z}_k^+ , и фази негативно идеално решење, \tilde{z}_k^- , одређени су применом *veto* концепта:

$$\tilde{z}_k^+ = ((1,1,1; \mu_1), (1,1,1; \mu_2)) \quad \tilde{z}_k^- = ((0,0,0; \mu_1), (0,0,0; \mu_2))$$

Корак 5. Вредност групне корисности, \tilde{S}_i , $i = 1, \dots, I$, израчуната је према процедури развијеној у конвенционалној *VIKOR* методи уз коришћење правила фази алгебре за *IT2TFNs*:

$$\tilde{S}_i = \sum_{k=1, \dots, K} \frac{\tilde{z}_k^+ - \tilde{z}_{ik}}{\tilde{z}_k^+ - \tilde{z}_k^-}$$

Ова променљива представља меру одступања која се користи за изражавање максималне групне корисности.

Корак 6. Вредност индивидуалног одступања за сваки начин отказа \tilde{R}_i , $i = 1, \dots, I$, одређена је применом методе за поређење *IT2TFNs* (*Chen и Lee, 2010*):

$$\tilde{R}_i = \max_{k=1, \dots, K} \frac{\tilde{z}_k^+ - \tilde{z}_{ik}}{\tilde{z}_k^+ - \tilde{z}_k^-}$$

Ова променљива представља минимално индивидуално одступање.

Корак 7. Генерални *VIKOR* индекс, \tilde{Q}_i , $i = 1, \dots, I$, одређује се као:

$$Q_i = \alpha \cdot \frac{d(\tilde{S}_i, \tilde{S}^*)}{d(\tilde{S}^{max}, \tilde{S}^*)} + (1 - \alpha) \cdot \frac{d(\tilde{R}_i, \tilde{R}^*)}{d(\tilde{R}^{max}, \tilde{R}^*)}$$

где:

α – коефицијент механизма одлучивања; $\alpha \in [0,1]$. Уколико је $\alpha = 1$ тада је постигнут максимум групне корисности и минимум индивидуалног одступања.

$$\tilde{S}^* = \min_{i=1, \dots, I} \tilde{S}_i \text{ и } \tilde{S}^{max} = \max_{i=1, \dots, I} \tilde{S}_i$$

$$\tilde{R}^* = \min_{i=1, \dots, I} \tilde{R}_i \text{ и } \tilde{R}^{max} = \max_{i=1, \dots, I} \tilde{R}_i$$

Вредности $d(\tilde{S}_i, \tilde{S}^*)$, $d(\tilde{S}_i, \tilde{S}^-)$, $d(\tilde{R}_i, \tilde{R}^*)$, и $d(\tilde{R}_i, \tilde{R}^-)$ су израчунате као дистанце између два *IT2TFNs* (*Chen и Lee, 2010*).

Корак 8. Избор начина отказа који имају највећу важност за оперативни менаџмент, надаље је објашњен кроз примену предложене процедуре.

Уколико је $\alpha = 0.5$, сматра се да је извршено компромисно рангирање. На првом месту у рангу се налази начин отказа коме је придружена најмања вредност Q_i , $i = 1, \dots, I$. Како би неки начин отказа био сматран најважнијим, неопходно је да задовољи следећа два услова:

Први услов (C1) – прихватљива предност:

Нека су i' и i'' означени као начини отказа који се налазе на првом и другом месту у рангу, респективно.

Потребно је проверити да ли је испуњен следећи услов:

$$Q_{i'} - Q_{i''} \geq \frac{1}{I - 1}$$

Где I представља укупан број разматраних начина отказа;

Други услов (C2) – Прихватљива стабилност при одлучивању:

Нека је i' начин отказа који се налази на првом месту у рангу на компромисној ранг листи. Уколико се разматрани начин отказа налази на првом месту у рангу према вредностима S_i , $\alpha = 1$ и/или R_i , $\alpha = 0$, тада се сматра да је компромисно решење i' стабилно током процеса одлучивања. Уколико један од наведена два услова није задовољен, тада се за начин отказа i' сматра да није важнији од осталих разматраних начина отказа.

Компромисно решење се може постићи праћењем следећих принципа:

а) Уколико C1 није испуњен, тада се компромисно решење може представити као скуп начина отказа (i', i'', \dots, i^n), где:

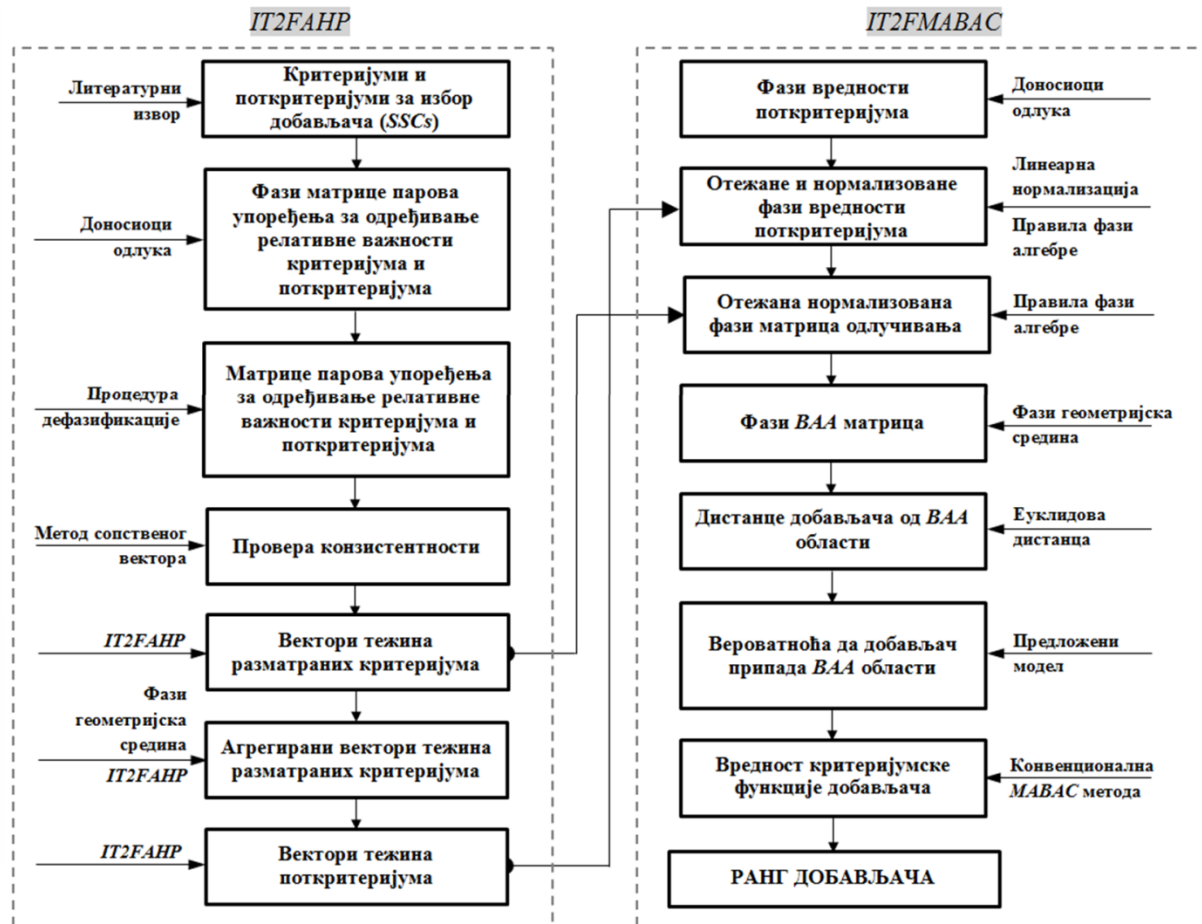
$$Q_{i^n} - Q_{i'} < \frac{1}{I - 1}$$

б) Уколико начин отказа i' не испуњава само услов C2, тада се скуп компромисних решења састоји од начина отказа који су ранжирани на првом и другом месту на компромисној ранг листи.

4.3 МОДЕЛ ЗА ОЦЕНУ И ИЗБОР ДОБАВЉАЧА У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ

У овом потпоглављу приказан је развијени модел за оцену и избор добављача у аутомобилској индустрији. С обзиром на то да су предузећа у аутомобилској индустрији повезана као ланац снабдевања, проблем оцене и избора добављача значајан је са аспекта одрживости и успешности пословања свих предузећа која у њему егзистирају, као и ланца снабдевања у целини. Модел који је приказан у овом потпоглављу, као и студија случаја приказана у потпоглављу 5.3, резултат су истраживања које је објављено кроз рад (Komatina и др., 2022b).

Важно је напоменути да је моделовање свих постојећих неизвесности у разматраном проблему извршено применом теорије фази скупова и фази алгебре, датих у раду (Mendel, 2017), а уједно и кроз радове (Mendel, John и Liu, 2006; Lee и Chen, 2008; Chen и Lee, 2010; Chen, 2014). Предложена процедура за оцену и избор добављача графички је представљена сликом 4.3 (Komatina и др., 2022b).



Слика 4.3 – Предложени модел за оцену и избор добављача (Komatina и др., 2022b)

Како би се на јаснији начин представио разматрани проблем, најпре је приказана коришћена нотација (Komatina и др., 2022b):

E – укупан број доносилаца одлука;

$e, e = 1, \dots, E$ – индекс доносиоца одлука;

K – укупан број критеријума за избор добављача (енгл. *supplier selection criteria(s)*, скр. *SSC(s)*);

$k, k = 1, \dots, K$ – индекс *SSC*;

J_k – укупан број поткритеријума разматраног *SSC*, k ;

$j, j = 1, \dots, J_k$ – индекс поткритеријума;

I – укупан број добављача;

$i, i = 1, \dots, I$ – индекс добављача;

$\tilde{W}_{kk'}^e$ – *IT2TFNs* којима се описује релативна важност *SSC*, k , у односу на *SSC*, k' , на основу процене доносиоца одлука, e ;

$\tilde{\omega}_k^e$ – *IT2TFNs* којима се описује тежина *SSC*, k , на нивоу доносиоца одлука, e ;

$\tilde{\omega}_k$ – *IT2TFNs* којима се описује агрегирана тежина *SSC*, k ;

$\tilde{W}_{jj'}$ – *IT2TFNs* којима се описује релативна важност поткритеријума, j , у односу на поткритеријум, j' разматраног критеријума *SSC*, k ;

$\tilde{\Theta}_j^k$ – *IT2TFNs* којима се описује тежина поткритеријума, j , разматраног критеријума *SSC*, k ;

\tilde{x}_{ij} – *IT2TFNs* којима се описује процењена вредност поткритеријума, j , разматраног критеријума *SSC*, k , на нивоу добављача, i ;

\tilde{r}_{ij} – *IT2TFNs* којима се описује нормализована вредност \tilde{x}_{ij} ;

\tilde{z}_{ik} – *IT2TFNs* којима се описује агрегирана нормализована вредност *SSC*, k на нивоу добављача, i ;

\tilde{v}_{ik} – *IT2TFNs* којима се описује вредност елемената фази матрице одлучивања;

\tilde{g}_k – *IT2TFNs* којима се описује вредност фази матрице граничне области апроксимације (енгл. *border approximation area*, скр. *BAA*);

$p(\tilde{v}_{ik}^U \geq \tilde{g}_k^U)$ – вероватноћа да је *IT2TFNs*, \tilde{v}_{ik} , веће или једнако *IT2TFN*, \tilde{g}_k ;

q_{ik} – Нормализована Еуклидова дистанца између *IT2TFNs*, \tilde{v}_{ik} , и *IT2TFN*, \tilde{g}_k ;

S_i – Вредност критеријумске функције на нивоу сваког добављача, i ;

Претпоставке које су уведене у предложени модел су следеће (*Komatina* и др., 2022b):

- Доносиоци одлука се формално могу представити скупом индекса $\{1, \dots, e, \dots, E\}$. Укупан број доносилаца одлука је означен са E , док је $e, e = 1, \dots, E$ индекс доносиоца одлука. У овом случају, доносиоци одлука су менаџер набавке, *EMS* (енгл. *Environmental Management System*) менаџер и менаџер безбедности и здравља на раду.
- Формано се *SSCs* могу представити скупом индекса $\{1, \dots, k, \dots, K\}$. Укупан број *SSCs* означен је са K , док је $k, k = 1, \dots, K$ индекс *SSC*. У овом истраживању, *SSCs* су дефинисани на основу релевантне литературе, тј. на основу рада (*Mohammed, Harris* и *Govindan*, 2019). Сваки од разматраних критеријума се може декомпоновати на поткритеријуме, који се формално могу представити скупом индекса $\{1, \dots, j, \dots, J_k\}$. Укупан број поткритеријума унутар сваког *SSC* означен је са J_k . Индекс поткритеријума се формално може представити као $j, j = 1, \dots, J_k$.

- У студији случаја су разматрани добављачи који обезбеђују једну или више сировина, а које су истовремено и најважније у смислу одржавања континуитета производног процеса у разматраном предузећу. Избор потенцијалних добављача заснован је на: а) анализи података из евиденције (историјских података) које поседује предузеће, б) коришћењу података из званичних билтена, в) запажањима доносилаца одлука и д) комбинованим приступима. Формално се скуп потенцијалних добављача може представити скупом индекса $\{1, \dots, i, \dots, I\}$, где је $i, i = 1, \dots, I$ индекс добављача. Укупан број добављача означен је са I . У овом истраживању је разматрано шест потенцијалних добављача.
- Неизвесности у одређивању релативне важности *SSCs*, као и неизвесности у процени релативне важности поткритеријума, одређују се на основу знања и искуства доносилаца одлука. За описивање ових неизвесности, доносиоци одлука користе лингвистичке исказе, који су моделовани помоћу *IT2TFNs*.

Основна намена предложене методологије је да обезбеди основ за двоструку проверу резултата добијених применом поступака за оцену добављача предложених стандардом *IATF 16949:2016* и појединим *VDA* приручницима. У случају да постоје значајна неслагања између резултата добијених применом предложене методологије и процедура дефинисаних у коришћеним стандардима и процедурама, неопходно је да највише руководство предузећа узме у обзир оба приступа и донесе коначну одлуку (*Komatina* и др., 2022b).

4.3.1 Моделовање релативне важности *SSCs*

Може се претпоставити да *SSCs* најчешће немају једнаку релативну важност и могу се сматрати непроменљивим током разматраног временског периода. У овом истраживању, релативна важност сваког *SSC* се одређује на основу релативне важности парова упоређења, тј. релативне важности сваког *SSC*, k , у односу на сваки остали *SSC*, k' , и то на основу процене доносиоца одлука, e . Доносиоци одлука своје процене исказују помоћу унапред дефинисаних пет лингвистичких исказа моделованих помоћу *IT2TFNs*. Многи аутори сматрају да је овакав начин исказивања процена ближи људском начину размишљања у односу на директну процену вредности помоћу *crisp* бројева (*Komatina* и др., 2022b).

Следеће претпоставке су уведене у овом истраживању (*Komatina* и др., 2022b):

Релативна важност *SSC*, k , у односу на *SSC*, k' , која се одређује на основу процене доносиоца одлука, e , може се записати као *IT2TFN* и формално представити на следећи начин:

$$\tilde{W}_{kk'}^e = \left((a_{kk'}^{Ue}, b_{kk'}^{Ue}, c_{kk'}^{Ue}; \alpha), (a_{kk'}^{Le}, b_{kk'}^{Le}, c_{kk'}^{Le}; \beta) \right)$$

У случају да је релативна важност *SSC*, k' , већа у односу на *SSC*, k , тада се процена доносиоца одлука, e , може се представити на следећи начин:

$$\tilde{W}_{kk'}^e = \left(\tilde{W}_{kk'}^e \right)^{-1}$$

У случају да SSC, k' , и SSC, k , имају једнаку релативну важност, тада се вредност матрице парова упоређења означава са „1” и записује на следећи начин као $IT2TFN$:

$$((1,1,1; \alpha_1), (1,1,1; \beta_1))$$

На исти начин се врши поређење релативне важности сваког пара поткритеријума унутар сваког SSC . Релативна важност сваког разматраног пара SSC и сваког разматраног пара поткритеријума унутар SSC , описана је коришћењем једног од пет унапред дефинисаних лингвистичких исказа (*Komatina* и др., 2022b):

Веома мало важније (VL) - $((1, 1, 7.5; 1), (1, 1, 7; 0.75))$

Мало важније (LV) - $((1, 3.5, 6; 1), (1.5, 3.5, 5.5; 0.75))$

Средње важније (MV) - $((2.5, 5, 7.5; 1), (3, 5, 7; 0.75))$

Много важније (HV) - $((4, 6.5, 9; 1), (4.5, 6.5, 8.5; 0.75))$

Веома много важније (VHV) - $((2.5, 9, 9; 1), (3, 9, 9; 0.75))$

Домен $IT2TFNs$ дефинисан је на интервалу [1-9]. Вредност 1 означава да је релативна важност SSC, k , у односу на SSC, k' , једнака, док вредност 9 означава да је релативна важност SSC, k , у односу на SSC, k' , веома много већа. Исти случај важи и када је реч о паровима упоређења поткритеријума унутар сваког SSC (*Komatina* и др., 2022b).

4.3.2 Моделовање неизвесних вредности $SSCs$

Фази оцене $SSCs$ дефинисане су консензусом од стране доносиоца одлука. Своје процене доносиоци одлука исказују на основу доступних података из евиденције, њиховог знања, искуства, као и на основу актуелних информација које поседују о разматраним добављачима. За исказивање процена, доносиоци одлука користе унапред дефинисане лингвистичке исказе моделоване помоћу $IT2TFNs$ (*Komatina* и др., 2022b):

Веома мала вредност ($L1$) - $((1, 1, 3.5; 1), (1, 1, 3; 0.9))$

Мала вредност ($L2$) - $((1, 2.5, 4; 1), (1.5, 2.5, 3.5; 0.9))$

Средње мала вредност ($L3$) - $((2, 3.5, 5; 1), (2.5, 3.5, 4.5; 0.9))$

Средња вредност ($L4$) - $((3.5, 5, 6.5; 1), (4, 5, 6; 0.9))$

Средње велика вредност ($L5$) - $((5, 6.5, 8; 1), (5.5, 6.5, 7.5; 0.9))$

Велика вредност ($L6$) - $((6, 7.5, 9; 1), (6.5, 7.5, 8.5; 0.9))$

Веома велика вредност ($L7$) - $((7.5, 9, 9; 1), (8, 9, 9; 0.9))$

Домен приказаних $IT2TFNs$ дефинисан је на интервалу [1-9], односно на Сатијевој скали мера (*Saaty*, 1980; *Saaty*, 2013). Вредност 1 означава да SSC има најмању вредност, док вредност 9 означава да SSC има највећу вредност (*Komatina* и др., 2022b).

4.3.3 Предложени алгоритам

Ранг разматраних добављача одређује се на основу методологије која је предложена у раду (Komatina и др., 2022b) и може се представити следећим алгоритмом:

Корак 1. Формирање фази матрице парова упоређења релативне важности $SSCs$ на нивоу доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$:

$$\left[\tilde{W}_{kk'}^e \right]_{K \times K'}, k, k' = 1, \dots, K; k \neq k'; e = 1, \dots, E$$

Корак 2. Коришћењем процедуре дефазификације дефинисане у (Kahraman и др., 2014), фази матрица парова упоређења $\left[\tilde{W}_{kk'}^e \right]_{K \times K'}$, трансформисана је у матрицу парова упоређења $\left[W_{kk'}^e \right]_{K \times K'}$.

У овом случају $W_{kk'}^e$ је:

$$W_{kk'}^e = \text{defuzz} \left(\tilde{W}_{kk'}^e \right), k, k' = 1, \dots, K; k \neq k'; e = 1, \dots, E$$

Коришћењем методе сопственог вектора (Saaty, 1980; Saaty, 2013), извршена је провера конзистентности процена доносилаца одлука. Ако је индекс конзистентности мањи или једнак 0.1, може се сматрати да грешке које праве доносиоци одлука не утичу на поузданост њихових процена.

Корак 3. Израчунавање вектора тежина, $\left[\tilde{\omega}_k^e \right]_{1 \times K}$ разматраног $SSCs$, на нивоу сваког доносиоца одлука, $e, e = 1, \dots, E$, је засновано на коришћењу процедуре (Kahraman и др., 2014). Вредност $\tilde{\omega}_k^e, k = 1, \dots, K$, се израчунава на исти начин, тако да:

$$\tilde{\omega}_k^e = \left(((a_k^e)^U, (b_k^e)^U, (c_k^e)^U; \alpha_1), ((a_k^e)^L, (b_k^e)^L, (c_k^e)^L; \beta_1) \right)$$

Корак 4. Агрегирана вредност вектора тежина $\tilde{\omega}_k$ одређује се применом фази геометријске средине (Mendel, 2017) и може се представити на следећи начин:

$$\tilde{\omega}_k = \left((a_k^U, b_k^U, c_k^U; \alpha_1), (a_k^L, b_k^L, c_k^L; \beta_1) \right)$$

Корак 5. Релативна важност поткритеријума унутар сваког SSC је оцењена од стране менаџера задуженог за реализацију пословног процеса на који разматрани SSC у највећој мери утиче. Релативна важност поткритеријума се може представити на следећи начин:

$$\left[\tilde{W}_{jj'} \right]_{J_k \times J_k}; j, j' = 1, \dots, J_k; j \neq j'; k = 1, \dots, K$$

Провера конзистентности извршена је на исти начин као и у *Кораку 2* предложеног алгоритма. Поступак дефазификације извршен је према (Kahraman и др., 2014), док је провера конзистентности извршена применом методе сопственог вектора (Saaty, 1980; Saaty, 2013). Вектор тежина поткритеријума унутар сваког критеријума $k, k = 1, \dots, K$, $\tilde{\Theta}_j^k$, одређује се применом *FAHP* методе (Kahraman и др., 2014) и може се представити на следећи начин:

$$\tilde{\Theta}_j^k = \left(\left((a_j^k)^U, (b_j^k)^U, (c_j^k)^U; \alpha_1 \right), \left((a_j^k)^L, (b_j^k)^L, (c_j^k)^L; \beta_1 \right) \right)$$

Корак 6. Фази процене вредности поткритеријума унутар сваког SSC , за сваког идентификованог добављача, може се означити као:

$$\tilde{x}_{ij} = \left((a_{ij}^U, b_{ij}^U, c_{ij}^U; \alpha), (a_{ij}^L, b_{ij}^L, c_{ij}^L; \beta) \right); i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J_k$$

Корак 7. Нормализација фази вредности поткритеријума врши се применом поступка линеарне нормализације (*Chen, 2001*):

а) за бенефитни тип критеријума:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\left(\frac{a_{ij}^U}{c^*}, \frac{b_{ij}^U}{c^*}, \frac{c_{ij}^U}{c^*}; \alpha \right), \left(\frac{a_{ij}^L}{c^*}, \frac{b_{ij}^L}{c^*}, \frac{c_{ij}^L}{c^*}; \beta \right) \right); i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J_k$$

б) за трошковни тип критеријума:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\left(\frac{a^*}{c_{ij}^U}, \frac{a^*}{b_{ij}^U}, \frac{a^*}{a_{ij}^U}; \alpha \right), \left(\frac{a^*}{c_{ij}^L}, \frac{a^*}{b_{ij}^L}, \frac{a^*}{a_{ij}^L}; \beta \right) \right); i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J_k$$

где је:

$$c^* = \max_{i=1, \dots, I} c_{ij}^U \text{ и } \min_{i=1, \dots, I} a_{ij}^U$$

Корак 8. Агрегиране нормализоване фази вредности поткритеријума $j, j = 1, \dots, J_k$ унутар сваког критеријума $k, k = 1, \dots, K$, \tilde{z}_{ik} , су одређене коришћењем $IT2FOWA$ оператора (*Zhou и др., 2010*):

$$\tilde{z}_{ik} = \sum_{j=1}^{J_k} \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{\Theta}_j^k; i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J_k, k, k = 1, \dots, K$$

Корак 9. Формира се отежана агрегирана нормализована фази матрица одлучивања, $[\tilde{v}_{ik}]_{I \times K}$, $i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$. Елементи ове матрице одређују се применом правила фази алгебре (*Mendel, 2017*):

$$\tilde{v}_{ik} = \tilde{\omega}_k \cdot \tilde{z}_{ik} + \tilde{\omega}_k$$

и

$$\tilde{v}_{ik} = \left((l_{ik}^U, m_{ik}^U, n_{ik}^U; \min(\alpha, \alpha_1)), (l_{ik}^L, m_{ik}^L, n_{ik}^L; \min(\beta, \beta_1)) \right); i = 1, \dots, I, k = 1, \dots, K$$

Корак 10. Формира се матрица граничне области апроксимације (ВАА матрица), $[\tilde{g}_k]_{1 \times K}$, $k = 1, \dots, K$. Елементи ове матрице одређују се применом правила фази алгебре (Mendel, 2017):

$$\tilde{g}_k = \sqrt[3]{\tilde{v}_{ik}}; \quad \tilde{g}_k = \left((l_k^U, m_k^U, n_k^U; \min(\alpha, \alpha_1)), (l_k^L, m_k^L, n_k^L; \min(\beta, \beta_1)) \right); k = 1, \dots, K$$

Корак 11. Припадност добављача ВАА унутар сваког критеријума одређује се на основу следећих правила:

$$i \in \begin{cases} G^+ & \text{if } p(\tilde{v}_{ik} > \tilde{g}_k) > 0.5 \\ G & \text{if } p(\tilde{v}_{ik} > \tilde{g}_k) = 0.5 \\ G^- & \text{if } p(\tilde{v}_{ik} > \tilde{g}_k) < 0.5 \end{cases}$$

где је:

$p(\tilde{v}_{ik}^U \geq \tilde{g}_k^U)$ је вероватноћа да је $IT2TFN$, \tilde{v}_{ik} већи или једнак $IT2TFN$, \tilde{g}_k :

$$p(\tilde{v}_{ik}^U \geq \tilde{g}_k^U) = \max \left\{ 1 - \max \left(\frac{\max(l_k^U - l_{ik}^U, 0) + 2 \cdot \max(m_k^U - m_{ik}^U, 0) + \max(n_k^U - n_{ik}^U, 0) + (n_k^U - l_{ik}^U) \max(\min(\alpha, \alpha_1), 0)}{|l_k^U - l_{ik}^U| + 2 \cdot |m_k^U - m_{ik}^U| + |n_k^U - n_{ik}^U| + (n_{ik}^U - l_{ik}^U) + (n_k^U - l_k^U) + \min(\alpha, \alpha_1)}, 0 \right), 0 \right\}$$

и има следеће особине (Chen и Lee, 2010):

$$\begin{aligned} 0 &\leq p(\tilde{v}_{ik}^U \geq \tilde{g}_k^U) \leq 1 \\ p(\tilde{v}_{ik}^U \geq \tilde{g}_k^U) + p(\tilde{g}_k^U \geq \tilde{v}_{ik}^U) &= 1 \\ p(\tilde{v}_{ik} \geq \tilde{g}_k) &= 0.5 \end{aligned}$$

Треба напоменути да је представљен специјалан случај формуле за израчунавање вероватноће два $IT2FNs$, који је дефинисан у раду (Chen и Lee, 2010). Горња фази матрица преферентности, када се разматрају два фази броја, може се одредити на следећи начин:

$$\begin{bmatrix} p(\tilde{v}_{ik}^U \geq \tilde{v}_{ik}^U) & p(\tilde{v}_{ik}^U \geq \tilde{g}_k^U) \\ p(\tilde{g}_k^U \geq \tilde{v}_{ik}^U) & p(\tilde{g}_k^U \geq \tilde{g}_k^U) \end{bmatrix}$$

На исти начин, доња фази матрица преферентности се одређује као:

$$\begin{bmatrix} p(\tilde{v}_{ik}^L \geq \tilde{v}_{ik}^L) & p(\tilde{v}_{ik}^L \geq \tilde{g}_k^L) \\ p(\tilde{g}_k^L \geq \tilde{v}_{ik}^L) & p(\tilde{g}_k^L \geq \tilde{g}_k^L) \end{bmatrix}$$

Ранг вредности $Rank(\tilde{A}_{ik}^U)$ и $Rank(\tilde{A}_{ik}^L)$, горње, односно доње троугаоне функције припадности, респективно, за $IT2FNs$, одређује се применом израза дефинисаних у (Хи, 2001).

Када се разматрају два $IT2FNs$, тада се ранг вредности одређује на основу следећих формула:

$$\text{Rank}(\tilde{A}_{ik}^U) = \frac{1}{2} \cdot (p(\tilde{v}_{ik}^U \geq \tilde{v}_{ik}^U) + p(\tilde{v}_{ik}^U \geq \tilde{g}_k^U)) \quad \text{Rank}(\tilde{A}_{ik}^L) = \frac{1}{2} \cdot (p(\tilde{v}_{ik}^L \geq \tilde{v}_{ik}^L) + p(\tilde{v}_{ik}^L \geq \tilde{g}_k^L))$$

$$\text{Rank}(\tilde{A}_{ik}) = \frac{\text{Rank}(\tilde{A}_{ik}^U) + \text{Rank}(\tilde{A}_{ik}^L)}{2}$$

Корак 12. Нека је q_{ik} , $i = 1, \dots, I$; $k = 1, \dots, K$, тада је $q_{ik} = d(\tilde{v}_{ik}, \tilde{g}_k)$, где је $d(\cdot)$ нормализована Еуклидова дистанца добављача од *BAAs*.

Корак 13. Вредност критеријумске функције добављача може се одредити на следећи начин:

$$S_i = \sum_{k=1}^K q_{ik}, \quad i = 1, \dots, I$$

Корак 14. Припадност добављача *BAА* области, узимајући у обзир све критеријуме истовремено, одређује се на основу вредности S_i .

4.4 МОДЕЛ ЗА АНАЛИЗУ ФАКТОРА КОЈИ УТИЧУ НА БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ ЗАПОСЛЕНИХ НА РАДНОМ МЕСТУ У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ

Модел приказан у овом потпоглављу дефинисан је у раду (*Komatina* и др., 2021) и настао је као резултат анализе захтева стејкхолдера. Студија случаја је спроведена у предузећу које је добављач првог реда у ланцу снабдевања у аутомобилској индустрији. Производни асортиман предузећа се заснива на производима од гуме који се уграђују у аутомобиле и друга моторна возила. Менаџмент компаније је, у жељи да унапреди постојећи производ, анализирао захтеве стејкхолдера који имају највећи утицај на један овакав пројекат.

Komatina и др. (2021) су најпре извршили анализу важности стејкхолдера за реализацију пројекта унапређења постојећег производа, и то са два аспекта: 1) заинтересованости за реализацију пројекта и 2) утицаја на реализацију пројекта. На основу изнетих процена менаџмента предузећа, утврђено је да су најважнији стејкхолдери за разматрани пројекат купци, а преваходно главни купац, тј. предузеће које је оригинални произвођач опреме у ланцу снабдевања и које потражује највеће количине производа од разматраног добављача.

Аутори рада су најважнијем стејкхолдеру, односно менаџменту разматраног предузећа, упутили списак захтева, дефинисаних на основу рада (*Mohammed, Harris* и *Govindan*, 2019), а под наведеним захтевима подразумевали су се: трошкови, квалитет производа, технолошки капацитет, поузданост испоруке, *EMS* систем, управљање отпадом, загађење, безбедност и здравље запослених, развој кадрова и доступност информација. Задатак менаџмента, односно доносилаца одлука, био је да одреди који од наведених захтева је за њих, као купце, најважнији. У овом случају, одабран је захтев који се односи на безбедност и здравље запослених на радном месту, јер су запослени, од стране овог купца, препознати као најважнији ресурс предузећа. Истовремено, запослени су препознати као најважнији фактор који утиче на реализацију пројекта развоја новог производа. Поступак избора најважнијих стејкхолдера и њихових захтева приказан је у раду (*Komatina* и др., 2021) и излази из оквира ове дисертације.

Како би се разматрани проблем детаљније анализирао, одабрани захтев стејкхолдера је потребно разложити на компоненте. Безбедност и здравље запослених на радном месту посматрани су кроз скуп фактора који су дефинисани у приручнику за управљање безбедношћу, издатог од стране Међународне организације цивилног ваздухопловства (ICAO, 2013). У овом приручнику, препознате су три групе фактора, а то су: 1) људски, 2) организациони и 3) технички/технолошки. Из тог разлога, ови фактори означени су скраћеницом *HOTRF(s)* (енгл. *Human, Organizational, and Technical/Technological Risk Factor(s)*). Свака од три групе фактора је додатно декомпонована са циљем да се одреди који фактори имају највећи утицај или, другачије речено, највише угрожавају безбедност и здравље запослених. За потребе овог истраживања анализирано је пет радних места. У циљу јаснијег сагледавања разматраног проблема представљена је усвојена нотација (Komatina и др., 2021):

E – укупан број доносилаца одлука;

$e, e = 1, \dots, E$ – индекс доносиоца одлука;

I – укупан број радних места;

$i, i = 1, \dots, I$ – индекс радног места;

J – укупан број *HOTRF(s)*.

$j, j = 1, \dots, J$ – индекс *HOTRF(s)*;

$\tilde{\omega}_j$ – релативна важност разматраног *HOTRF, j*.

\tilde{x}_{ji} – *IT2TFNs* којима се описује процењена вредност *HOTRF, j*, на нивоу радног места, i ;

\tilde{z}_{ji} – *IT2TFNs* којима се описује отежана вредност *HOTRF, j*, на нивоу радног места, i ;

\tilde{z}_j^+ и \tilde{z}_j^- – фази позитивно и фази негативно идеално решење, респективно;

d_i^+ и d_i^- – дистанце од фази позитивног и фази негативног идеалног решења, респективно;

c_j – коефицијент приближења;

$\tilde{\delta}_j$ – укупан степен веровања да *HOTRF, j*, има утицај на безбедност и здравље радника на разматраном радном месту, i , одређен применом *IT2FSAW* metode

γ_j – коефицијент рангирања на основу ког се одређује ранг *HOTRFs* применом *IT2FSAW* методе.

WS – коефицијент сличности рангирања.

У предложени модел уведене су следеће претпоставке (Komatina и др., 2021):

- Доносиоци одлука се формално могу представити скупом индекса $\{1, \dots, e, \dots, E\}$. Укупан број доносилаца одлука је означен са E , док је $e, e = 1, \dots, E$, индекс доносиоца одлука. Доносиоци одлука који су укључени у реализацију овог истраживања су: 1) менаџер људских ресурса, 2) индустријско-организациони психолог, 3) менаџер производње, 4) менаџер логистике, 5) менаџер квалитета, 6) менаџер безбедности и здравља на раду, 7) супервизор производње, 8) менаџер професионалног одржавања, 9) менаџер аутономног одржавања и 10) аналитичар података.

- Радна места (радне јединице) се формално могу представити скупом индекса $\{1, \dots, i, \dots, I\}$. Укупан број радних места је означен са I , док је $i, i = 1, \dots, I$ индекс радног места.

Радна места која су предмет истраживања су: 1) оператер на машини за кримповање, 2) оператер на машини за сечење и спајање профила, 3) оператер на флокинг машини, 4) оператер на машини за екструдирање и 5) оператер на преси.

- *HOTRFs* су сврстани у три групе: 1) људски, 2) организациони и 3) технички/технолошки фактори. *HOTRFs* се формално могу представити скупом индекса $\{1, \dots, j, \dots, J\}$. Укупан број *HOTRFs* је означен са J , док је $j, j = 1, \dots, J$ индекс разматраног *HOTRFs*.

Важно је напоменути да су разматрана радна места различита по питању степена аутоматизације и ангажованости радника. То се превасходно односи на разлику у уложеном труду, концентрацији радника, комплексности операција и сл. Осим тога, треба рећи да су радници довољно обучени за рад на разматраним радним местима и да поседују одговарајуће формално образовање за обављање радних задатака.

Предложена методологија интегрише модификовану Делфи методу и *IT2FTOPSIS*. Применом Делфи методе се одређује релативна важност *HOTRFs*, док се применом *IT2FTOPSIS* врши рангирање *HOTRFs*. У циљу провере добијених резултата, *HOTRFs* су рангирани и применом *IT2FSAW* методе, а затим је добијени ранг упоређиван са рангом *HOTRFs* који је добијен применом *IT2FTOPSIS* методе. За поређење резултата добијених применом ове две методе коришћена је методологија развијена у раду (*Salabun* и *Urbaniak*, 2020).

4.4.1 Моделовање релативне важности *HOTRFs*

Релативна важност *HOTRFs* се одређује на основу процена доносилаца одлука. За исказивање процена доносиоци одлука користе један од девет унапред дефинисаних лингвистичких исказа моделованих помоћу *IT2TFNs*. Своје процене доносиоци одлука исказују писаним путем, односно путем упитника, који им је послат путем имејла. Консензус се постиже применом принципа Делфи методе, односно кроз процене у више итерација, што је и објашњено кроз предложени алгоритам. За исказивање процена доносилаца одлука коришћени су следећи лингвистички искази (*Komatina* и др., 2021):

Екстремно мала важност ($W1$) - $((0, 0.1, 0.25; 1), (0, 0.1, 0.2; 0.85))$

Веома мала важност ($W2$) - $((0.05, 0.2, 0.35; 1), (0.1, 0.2, 0.3; 0.85))$

Мала важност ($W3$) - $((0.15, 0.3, 0.45; 1), (0.2, 0.3, 0.4; 0.85))$

Умерено мала важност ($W4$) - $((0.25, 0.4, 0.55; 1), (0.3, 0.4, 0.5; 0.85))$

Умерена важност ($W5$) - $((0.35, 0.5, 0.65; 1), (0.4, 0.5, 0.6; 0.85))$

Умерено велика важност ($W6$) - $((0.45, 0.6, 0.75; 1), (0.5, 0.6, 0.7; 0.85))$

Велика важност ($W7$) - $((0.55, 0.7, 0.85; 1), (0.6, 0.7, 0.8; 0.85))$

Веома велика важност ($W8$) - $((0.65, 0.8, 0.95; 1), (0.7, 0.8, 0.9; 0.85))$

Екстремно велика важност ($W9$) - $((0.75, 0.9, 1; 1), (0.8, 0.9, 1; 0.85))$

Домен приказаних $IT2TFNs$ дефинисан је на интервалу $[0-1]$. Вредност 0 означава да је важност $HOTRF$ екстремно мала (готово занемарљива), док вредност 1 означава да је важност $HOTRF$ екстремно велика (Komatina и др., 2021).

4.4.2 Моделовање неизвесних вредности $HOTRFs$

Процена утицаја $HOTRFs$ на безбедност и здравље радника на разматраним радним местима врши се од стране главног менаџера предузећа. Доносилац одлука исказује своје процене кроз различит степен веровања да разматрани $HOTRF$ има утицај на безбедности и здравље радника на разматраном радном месту. За исказивање процена користи се седам унапред дефинисаних лингвистичких исказа. Моделовање лингвистичких исказа извршено је коришћењем $IT2TFNs$ и формално се могу представити на следећи начин (Komatina и др., 2021):

Веома низак степен веровања ($V1$) - $((1, 1, 3.5; 1), (1, 1, 3; 0.9))$

Низак степен веровања ($V2$) - $((1, 2.5, 4; 1), (1.5, 2.5, 3.5; 0.9))$

Умерено низак степен веровања ($V3$) - $((2.5, 4, 5.5; 1), (3, 4, 5; 0.9))$

Умерен степен веровања ($V4$) - $((3.5, 5, 6.5; 1), (4, 5, 6; 0.9))$

Умерено висок степен веровања ($V5$) - $((4.5, 6, 7.5; 1), (5, 6, 7; 0.9))$

Висок степен веровања ($V6$) - $((6, 7.5, 9; 1), (6.5, 7.5, 8.5; 0.9))$

Веома висок степен веровања ($V7$) - $((7.5, 9, 9; 1), (8, 9, 9; 0.9))$

Домен приказаних $IT2TFNs$ дефинисан је на интервалу $[1-9]$. Вредност 1 означава веома низак степен веровања да разматрани $HOTRF$ има утицај на безбедност и здравље радника на разматраном радном месту. С друге стране, вредност 9 означава веома висок степен веровања да разматрани $HOTRF$ има утицај на безбедност и здравље радника на разматраном радном месту (Komatina и др., 2021).

4.4.3 Предложени алгоритам

Утицај $HOTRFs$ на безбедност и здравље запослених на разматраним радним местима, односно ранг $HOTRFs$, одређује се применом методологије која је дефинисана у раду (Komatina и др., 2021) и може се представити кроз следеће кораке предложеног алгоритма:

Корак 1. У првој итерацији примене Делфи методе врши се процена релативне важности $HOTRFs$, $j, j = 1, \dots, J$, од стране доносилаца одлука, $e, e = 1, \dots, E$:

$$\tilde{W}_j^e$$

Корак 2. Агрегација релативне важности $HOTRFs$, $j, j = 1, \dots, J$, на основу изнетих процена свих доносилаца одлука, применом оператора фази аритметичке средине:

$$\tilde{W}_j = \frac{1}{E} \cdot \sum_{e=1, \dots, E} \tilde{W}_j^e$$

Корак 3. Одређивање варијансе агреgirаних вредности релативне важности $HOTRFs, j, j = 1, \dots, J$:

$$\frac{1}{E-1} \cdot \sum_{e=1, \dots, E} (\tilde{W}_j - \tilde{W}_j^e)^2 = S_j^2$$

где је вредност $\tilde{W}_j - \tilde{W}_j^e$ израчуната као Еуклидова дистанца према формули из (Zhang, Zhang и Mei, 2009).

Корак 4. Применом технике анализе варијансе тестира се хипотеза на нивоу ризика од 5% да је варијанса агреgirаних процена релативних важности $HOTRFs, j, j = 1, \dots, J$, мања од претпостављене вредности варијансе σ_0^2 . У случају да хипотеза није усвојена, поступак се враћа на *Корак 1* предложеног алгоритма. У супротном, усвајају се релативне важности израчунате у *Кораку 3* предложеног алгоритма.

Корак 5. Формирање фази матрице одлучивања:

$$[\tilde{x}_{ji}]_{J \times I}$$

Елементи фази матрице одлучивања су дефинисани као степен веровања да $HOTRF, j, j = 1, \dots, J$, има утицај на безбедност и здравље радника на радном месту $i, i = 1, \dots, I$.

Корак 6. Отежана фази матрица одлучивања:

$$[\tilde{z}_{ji}]_{J \times I}$$

где је:

$$\tilde{z}_{ji} = \tilde{\omega}_j \cdot \tilde{x}_{ji}$$

Вредности \tilde{z}_{ji} се одређују применом правила фази алгебре дефинисаних у (Mendel, 2017).

Корак 7. Фази позитивно, \tilde{z}_j^+ , и фази негативно идеално решење, \tilde{z}_j^- :

$$(\forall i): \tilde{z}_j^+ = \left(\left(\max_{j=1, \dots, J} a_{1i}^U, \max_{i=1, \dots, I} a_{2i}^U, \max_{i=1, \dots, I} a_{3i}^U; 1 \right), \left(\max_{i=1, \dots, I} a_{1i}^L, \max_{i=1, \dots, I} a_{2i}^L, \max_{i=1, \dots, I} a_{3i}^L; 0.75 \right) \right)$$

$$(\forall i): \tilde{z}_j^- = \left(\left(\min_{i=1, \dots, I} a_{1i}^U, \min_{i=1, \dots, I} a_{2i}^U, \min_{i=1, \dots, I} a_{3i}^U; 1 \right), \left(\min_{i=1, \dots, I} a_{1i}^L, \min_{i=1, \dots, I} a_{2i}^L, \min_{i=1, \dots, I} a_{3i}^L; 0.75 \right) \right)$$

Корак 8. Еуклидова дистанца од фази позитивног идеалног решења, d_i^+ , и фази негативног идеалног решења, d_i^- :

$$d_i^+ = \sum_{i=1, \dots, I} d(d_i^+, \tilde{z}_{ji}) \qquad d_i^- = \sum_{i=1, \dots, I} d(d_i^-, \tilde{z}_{ji})$$

Корак 9. Коefицијент приближења, c_j , се рачуна на следећи начин:

$$c_j = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}$$

Корак 10. Укупан степен веровања да $HOTRF, j$, има утицај на безбедност и здравље радника на разматраном радном месту, i , одређен је применом $IT2FSAW$ методе:

$$\tilde{\delta}_j = \sum_{i=1, \dots, I} \tilde{z}_{ij}$$

Корак 11. Израчунавање коefицијента рангирања, γ_j , на основу ког се одређује ранг $HOTRFs$ применом $IT2FSAW$ методе, засновано је на поређењу фази бројева (*Liu и Mendel, 2008*).

Корак 12. Вредности коefицијента приближења, c_j , као и коefицијента рангирања, γ_j , сортирани су у опадајући низ. Ранг $HOTRFs$ је заснован на овом поретку.

Корак 13. Коefицијент сличности рангирања, WS , одређује се на следећи начин (*Salabun и Urbaniak, 2020*):

$$WS = 1 - \sum_i^I 2^{-R_{x_i}} \cdot \frac{|R_{x_i} - R_{y_i}|}{\max\{|1 - R_{x_i}|, |I - R_{x_i}|\}}$$

где су R_{x_i} и R_{y_i} вредности ранга $HOTRFs$, i , одређени применом $IT2FTOPSIS$ и $IT2FSAW$ методе, респективно.

4.5 МОДЕЛ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ СКУПА НАЧИНА ОТКАЗА ЗАСНОВАН НА $IT2FANP$ И МЕТАХЕУРИСТИЧКОМ ПРИСТУПУ

Модел приказан у овом потпоглављу представља нови приступ за одређивање приоритета начина отказа, који се реализује у две фазе. У првој фази се, применом $PFMEA$ оквира и $IT2FANP$ методе, одређује приоритет начина отказа, док се у другој фази, применом Генетског алгоритма и Методе променљивих околина, одређује скуп начина отказа који имају највећи утицај на реализацију процеса производње. Развијени модел и студија случаја резултат су истраживања које је објављено у раду (*Komatina и др., 2023*).

Предложени модел, који је шематски приказан сликом 4.4, може се представити кроз следеће аспекте (*Komatina и др., 2023*):

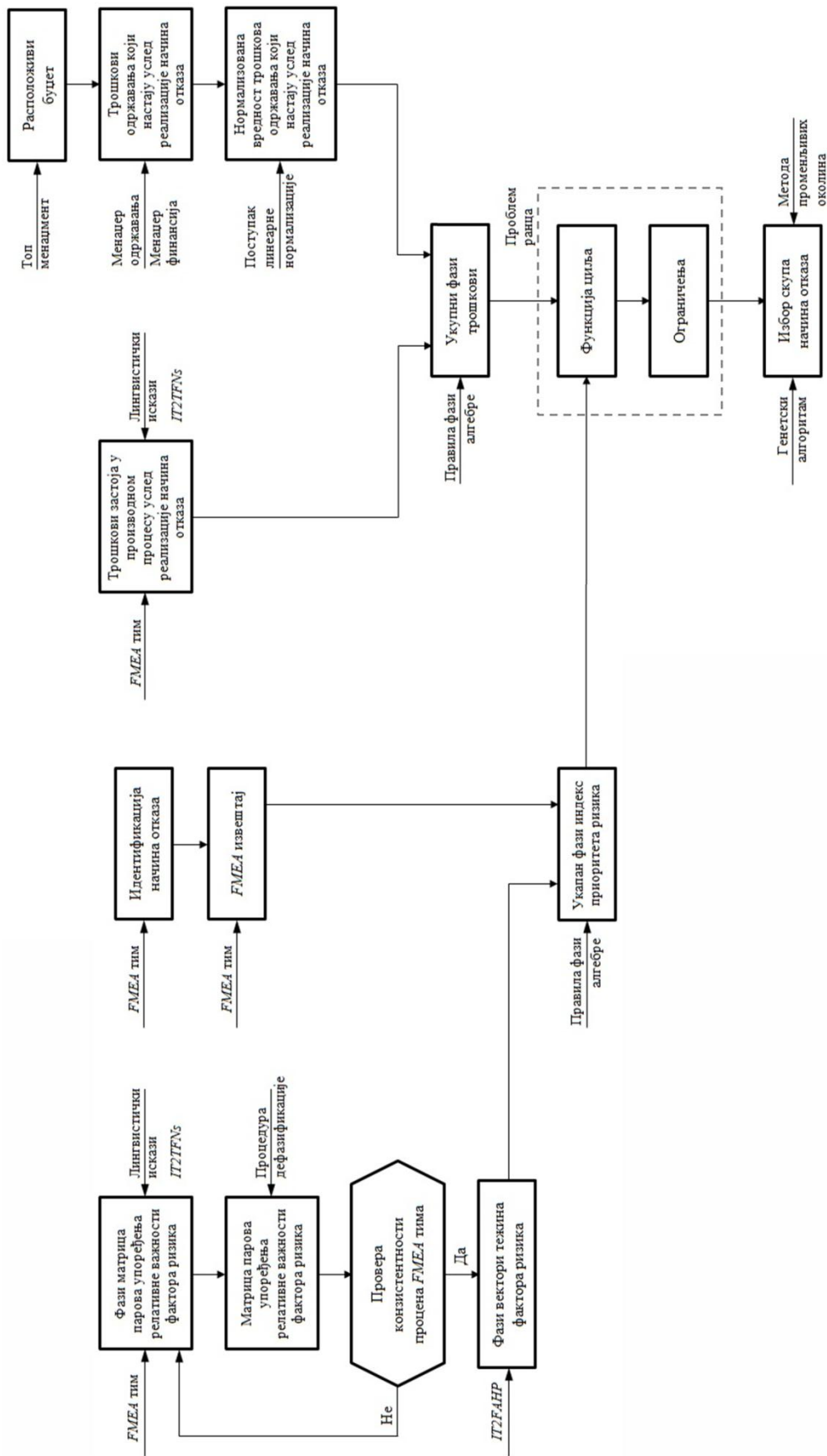
Домен примене: Подаци коришћени у овом истраживању су добијени из различитих предузећа аутомобилске индустрије са подручја Републике Србије. Разматрана предузећа припадају групи малих и средњих предузећа у којима је претежно заступљен механизован технолошки ниво. Тек поједини делови производног процеса су аутоматизовани. Свако разматрано предузеће има формиран (P) $FMEA$ тим, који врши идентификацију потенцијалних начина отказа.

Прикупљање података: Вредности разматраних фактора ризика (*S*, *O* и *D*) преузете су из *PFMEA* извештаја. Осим тога, процена релативне важности фактора ризика извршена је од стране *FMEA* тимова посредством онлајн упитника. Чланови *FMEA* тимова су своје одлуке доносили консензусом. За исказивање процена, чланови *FMEA* тимова су користили унапред дефинисане лингвистичке исказе, моделоване применом *IT2TFNs*.

Приоритет начина отказа: За одређивање фази вектора тежина фактора ризика коришћена је *IT2FANP* метода. Отежане вредности фактора ризика одређене су као производ вектора тежина и њихових вредности (аналогно *Kudlač* и др., 2017; *Yazdi*, 2019; *Aleksić* и др., 2019). Приоритет начина отказа одређен је на основу фази *RPN* параметра, односно збира отежаних вредности фактора ризика (аналогно *Zhou* и *Thai*, 2016).

Аспект трошкова: Реализација идентификованих начина отказа доводи до генерисања трошкова одржавања и трошкова насталих услед застоја у производном процесу. Укупни трошкови који настају услед реализације сваког начина отказа одређени су као збир ове две категорије трошкова. Трошкови одржавања могу довољно прецизно да буду одређени од стране менаџера одржавања и менаџера финансија. Они своје процене заснивају на подацима из евиденције, узимајући у обзир потенцијалне промене цена на тржишту. С друге стране, трошкове који настају услед застоја производног процеса процењује *FMEA* тим, на основу свог знања и искуства. Важно је нагласити да су трошкови одржавања изражени у новчаним јединицама, па је њихову вредност потребно пресликати на интервал $[0-1]$. У овом истраживању је коришћен поступак линеарне нормализације (*Pomerol* и *Barba-Romero*, 2000).

Одређивање оптималног скупа начина отказа: У пракси, *FMEA* тим одлуку о избору начина отказа које треба третирати заснива на разматрању два критеријума: 1) да приоритет начина отказа буде што већи и 2) да укупни трошкови буду што нижи. Стога, у овом истраживању, функција циља је дефинисана као количник фази *RPN* параметра и укупних трошкова. Ограничење која се узима у обзир у предложеном оптимизационом моделу односи се на буџет који *FMEA* тим има на располагању.



Слика 4.4 – Предложени модел за одређивање оптималног скупа начина отказа (Коматина и др., 2023)

Ознаке коришћене у предложеном моделу приказане су кроз нотацију (*Komatina* и др., 2023):

T – укупан број идентификованих начина отказа;

$t, t = 1, \dots, T$ – индекс начина отказа;

K – укупан број фактора ризика (*RFs*);

$k, k = 1, \dots, K$ – индекс фактора ризика;

$\tilde{W}_{kk'}$ – *IT2TFN* којим се описује релативна важност *RF*, k , у односу на *RF*, k' ; $k, k' = 1, \dots, K$; $k \neq k'$;

$\tilde{\omega}_k$ – *IT2TFN* којим се описује фази тежина *RF*, k , $k = 1, \dots, K$;

v_{tk} – *crisp* вредност *RF*, k , $k = 1, \dots, K$, за начин отказа, t , $t = 1, \dots, T$;

\tilde{p}_t – *IT2TFN* којим се описује укупан фази индекс приоритета ризика;

c_{1t} – трошкови одржавања који настају услед реализације начина отказа;

r_{1t} – нормализована вредност трошкова одржавања који настају услед реализације начина отказа;

\tilde{c}_{2t} – *IT2TFN* који одговара трошковима застоја у производном процесу услед реализације начина отказа;

\tilde{c}_t – укупни фази трошкови;

C – укупан буџет којим располаже *FMEA* тим.

У наставку овог потпоглавља представљен је начин моделовања неизвесних вредности, како релативне важности фактора ризика, тако и вредности трошкова застоја, који настају услед реализације начина отказа. Поред тога, представљен је и предложени математички модел са оптимизационим решењима.

4.5.1 Моделовање релативне важности *RFs*

За описивање релативне важности *RFs* коришћена су три унапред дефинисана лингвистичка исказа. Ови лингвистички искази моделовани су помоћу *IT2TFNs* и то на следећи начин (*Komatina* и др., 2023):

Мало важније (*W1*) - $((1, 1, 5; 1), (1, 1, 4; 0.7))$

Умерено важније (*W2*) - $((1, 3, 5; 1), (2, 3, 4; 0.7))$

Веома важније (*W3*) - $((1, 5, 5; 1), (2, 5, 5; 0.7))$

Домен коришћених *IT2TFNs* дефинисан је на интервалу [1-5]. Вредност 1 означава да је релативна важност *RF*, k , у односу на *RF*, k' , једнака, док вредност 5 означава да је релативна важност *RF*, k , у односу на *RF*, k' , много већа (*Komatina* и др., 2023).

4.5.2 Моделовање неизвесних вредности трошкова застоја

Застоји у производном процесу, који се јављају као последица реализације идентификованих начина отказа, могу се значајно одразити на његову ефективност, а такође и на ефективност целокупног пословања. Иако је ове трошкове веома тешко прецизно одредити, претпоставка је да *FMEA* тим сваког предузећа има довољно знања и искуства да сасвим поуздано може да процени вредност ових трошкова. У овом истраживању, за процену трошкова застоја је коришћено седам лингвистичких исказа (*Komatina* и др., 2023):

Готово занемарљиви трошкови (*C1*) - $((0.1, 0.1, 0.25; 1), (0.1, 0.1, 2; 0.85))$

Веома ниски трошкови (*C2*) - $((0.15, 0.25, 0.35; 1), (0.2, 0.25, 0.3; 0.85))$

Умерено ниски трошкови (*C3*) - $((0.25, 0.4, 0.55; 1), (0.3, 0.35, 0.5; 0.85))$

Умерени трошкови (*C4*) - $((0.4, 0.55, 0.7; 1), (0.45, 0.55, 0.65; 0.85))$

Умерено високи трошкови (*C5*) - $((0.55, 0.7, 0.85; 1), (0.6, 0.7, 0.8; 0.85))$

Веома високи трошкови (*C6*) - $((0.75, 0.85, 0.95; 1), (0.8, 0.85, 0.9; 0.85))$

Екстремно високи трошкови (*C7*) - $((0.85, 1, 1; 1), (0.9, 1, 1; 0.85))$

Домен наведених *IT2TFNs* дефинисан је на интервалу $[0-1]$. Вредност 0 означава да је вредност трошкова готово занемарљива, док вредност 1 означава да је вредност трошкова екстремно велика (*Komatina* и др., 2023).

4.5.3 Предложени математички модел

Предложени алгоритам је представљен кроз следеће кораке (*Komatina* и др., 2023):

Корак 1. Фази матрица парова упоређења за одређивање релативне важности *RFs* се формално може представити на следећи начин:

$$[\tilde{W}_{kk'}]_{K \times K}$$

где је:

$$\tilde{W}_{kk'} = ((a_{1kk'}^U, a_{2kk'}^U, a_{3kk'}^U; 1)(a_{1kk'}^L, a_{2kk'}^L, a_{3kk'}^L; \alpha))$$

Корак 2. Трансформација фази матрице парова упоређења у матрицу парова упоређења применом процедуре дефазификације (*Kahraman* и др., 2014):

$$[W_{kk'}]_{K \times K}$$

где је:

$$W_{kk'} = DTriT \tilde{W}_{kk'} =$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ \frac{(a_{3kk'}^U - a_{1kk'}^U) + (a_{2kk'}^U - a_{1kk'}^U)}{3} + a_{1kk'}^U + \alpha \right. \\ \left. \cdot \left[\frac{(a_{3kk'}^L - a_{1kk'}^L) + (a_{2kk'}^L - a_{1kk'}^L)}{3} + a_{1kk'}^L \right] \right\}$$

Коришћењем методе сопственог вектора (Saaty, 2013), извршена је провера конзистентности процена доносилаца одлука.

Корак 3. Вектори тежина су израчунати применом процедуре дефинисане у раду (Kahraman и др., 2014):

$$\tilde{\omega}_k = \left(\left(\frac{\sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{1kk'}^U}}{\sum_{k=1, \dots, K} \sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{3kk'}^U}}, \frac{\sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{2kk'}^U}}{\sum_{k=1, \dots, K} \sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{2kk'}^U}}, \frac{\sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{3kk'}^U}}{\sum_{k=1, \dots, K} \sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{1kk'}^U}}; 1 \right), \right. \\ \left. \left(\frac{\sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{1kk'}^L}}{\sum_{k=1, \dots, K} \sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{3kk'}^L}}, \frac{\sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{2kk'}^L}}{\sum_{k=1, \dots, K} \sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{2kk'}^L}}, \frac{\sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{3kk'}^L}}{\sum_{k=1, \dots, K} \sqrt[k]{\prod_{k'=1, \dots, K} a_{1kk'}^L}}; \alpha \right) \right)$$

Коначно, вектори тежина се формално могу записати на следећи начин:

$$\tilde{\omega}_k = \left((b_{1k}^U, b_{2k}^U, b_{3k}^U; 1) (b_{1k}^L, b_{2k}^L, b_{3k}^L; \alpha) \right)$$

Корак 4. Укупан фази индекс приоритета ризика, \tilde{p}_t , одређен је наследећи начин:

$$\tilde{p}_t = \sum_{k=1, \dots, K} v_{tk} \cdot \tilde{\omega}_k$$

и формално се може записати у следећем облику:

$$\tilde{p}_t = \left((d_{1t}^U, d_{2t}^U, d_{3t}^U; 1) (d_{1t}^L, d_{2t}^L, d_{3t}^L; \alpha) \right)$$

Корак 5. Сваком начину отказа придружени су трошкови одржавања, c_{1t} , као и трошкови застоја, \tilde{c}_{2t} , $t = 1, \dots, T$.

Корак 6. Укупни трошкови настали услед реализације идентификованих начина отказа, \tilde{c}_t , $t = 1, \dots, T$, одређени су на следећи начин:

$$\tilde{c}_t = r_{1t} + \tilde{c}_{2t}$$

где је:

$$r_{1t} = \frac{c_{1t}}{\sum_{t=1, \dots, T} c_{1t}}$$

Укупна вредност трошкова за сваки идентификовани начин отказа може се записати на следећи начин:

$$\tilde{c}_t = ((g_{1t}^U, g_{2t}^U, g_{3t}^U; 1)(g_{1t}^L, g_{2t}^L, g_{3t}^L; \beta))$$

Корак 7. Оптимизациони модел је дефинисан на следећи начин:

Функција циља:

$$\max_{j=1,\dots,J} (defuzz \sum \frac{\tilde{p}_t}{\tilde{c}_t})$$

$$\max_{j=1,\dots,J} defuzz \sum \left(\left(\frac{d_{1t}^U}{g_{3t}^U}, \frac{d_{2t}^U}{g_{2t}^U}, \frac{d_{3t}^U}{g_{1t}^U}; \min(1,1) \right), \left(\frac{d_{1t}^L}{g_{3t}^L}, \frac{d_{2t}^L}{g_{2t}^L}, \frac{d_{3t}^L}{g_{1t}^L}; \min(\alpha, \beta) \right) \right)$$

При чему се узима у обзир следеће ограничење:

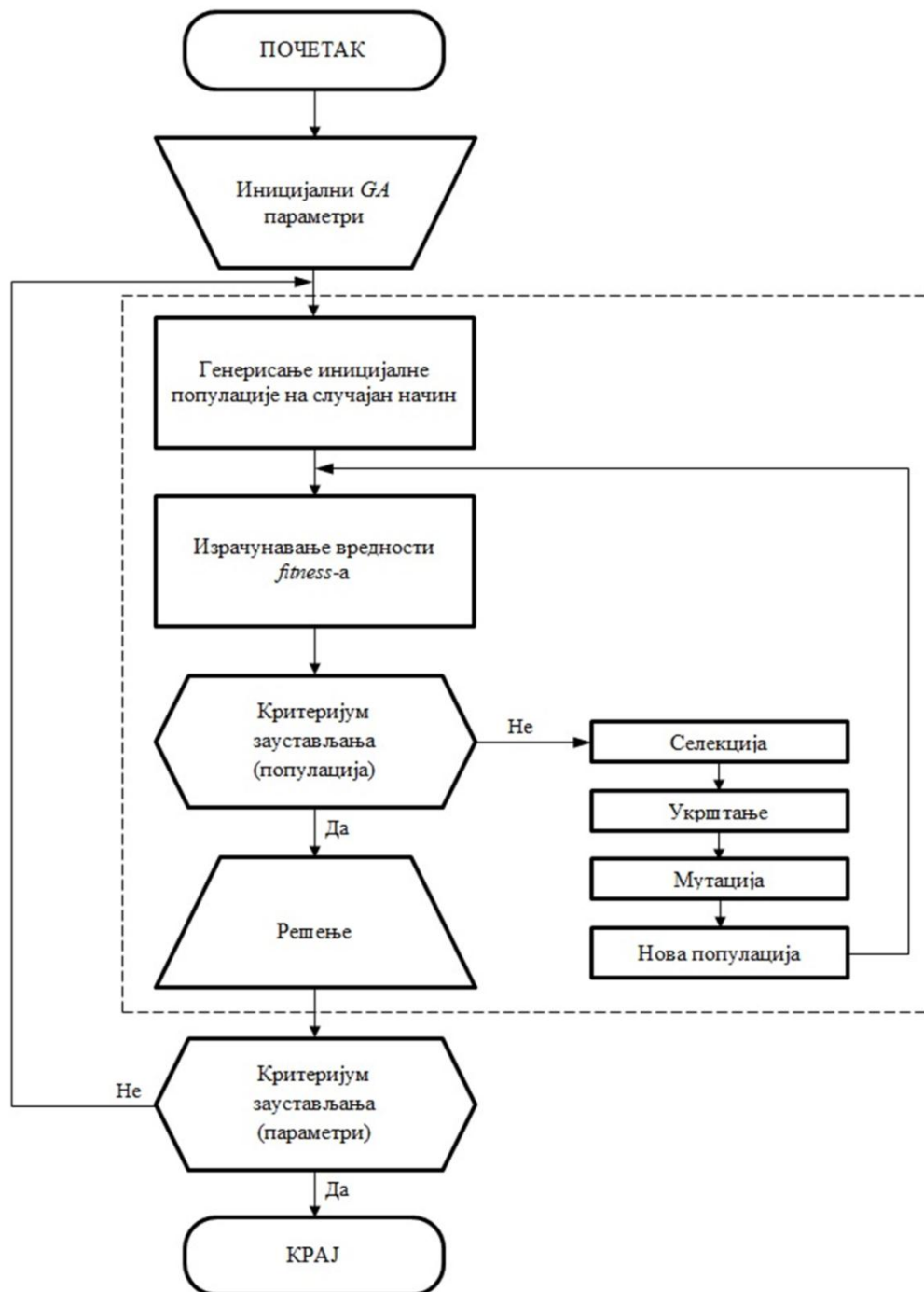
$$\sum_{j=1,\dots,J} c_{1j} \leq C$$

Приказани оптимизациони модел има линеарну функцију циља (*fitness*), која се односи на максимизацију односа (количника) укупног фази индекса приоритета отказа и укупних трошкова, за сваки разматрани начин отказа. Модел садржи једно линеарно ограничење, односно да укупни трошкови одржавања не превазилазе расположиви буџет (*Komatina* и др., 2023).

4.5.4 Оптимизациона решења

Као што је већ речено, у овом истраживању, а за решавање разматраног проблема, коришћене су две хеуристике, Генетски алгоритам и Метода променљивих околина. Када је реч о примени Генетског алгоритма, проблем оптимизације је постављен на следећи начин (*Komatina* и др., 2023):

- 1) вероватноћа селекције дефинисана је пропорционално *fitness*-у,
- 2) параметар елитизма је постављен на 0,05%,
- 3) хромозоми су кодирани бинарним записом, чија је дужина једнака броју елемената,
- 4) коришћен је униформни оператор укрштања, са једном, фиксном тачком и
- 5) дефинисани су следећи параметри: величина популације је 100, број итерација је ограничен на један милион, као што је и приказано на слици 4.5 (*Komatina* и др., 2023).



Слика 4.5 – Поступак примене Генетског алгорита за решавање проблема избора скупа начина отказа (Komatina и др., 2023)

Кроз предложени модел је уведена нова функција у имплементацији Генетског алгорита, која омогућава адаптивну програмску контролу параметара укрштања и мутације за сваки појединачни скуп података. Дефинисани параметри укрштања и мутације приказани су у табели 4.4. Генетски алгорита је примењен у *C#* (*C Sharp*) програмском језику (Komatina и др., 2023).

Табела 4.4 – Параметри укрштања и мутације за примену Генетског алгоритма (*Komatina* и др., 2023)

Величина узорка	Параметар укрштања	Параметар мутације
25	0,90	0,10
50	0,90	0,05
87	0,95	0,05
93	0,95	0,05
146	0,90	0,02

Осим примене Генетског алгоритма, за решавање разматраног проблема, коришћена је Метода променљивих околина. Опште је познато да је ова хеуристика заснована на промени структуре околине, како би била извршена претрага нових решења, све са циљем проналаска глобалног решења. С обзиром на то да постоје различити начини за формирање структуре околине, у овом истраживању, она је дефинисана помоћу концепта убацивања и избацивања елемената (предмета) из ранца (слика 4.6), што се може представити на следећи начин (*Komatina* и др., 2023):

Околина 1: убацивање једног елемента и избацивање једног елемента,

Околина 2: убацивање два елемента и избацивање два елемента,

Околина 3: убацивање три елемента и избацивање три елемента,

Околина 4: избацивање два елемента,

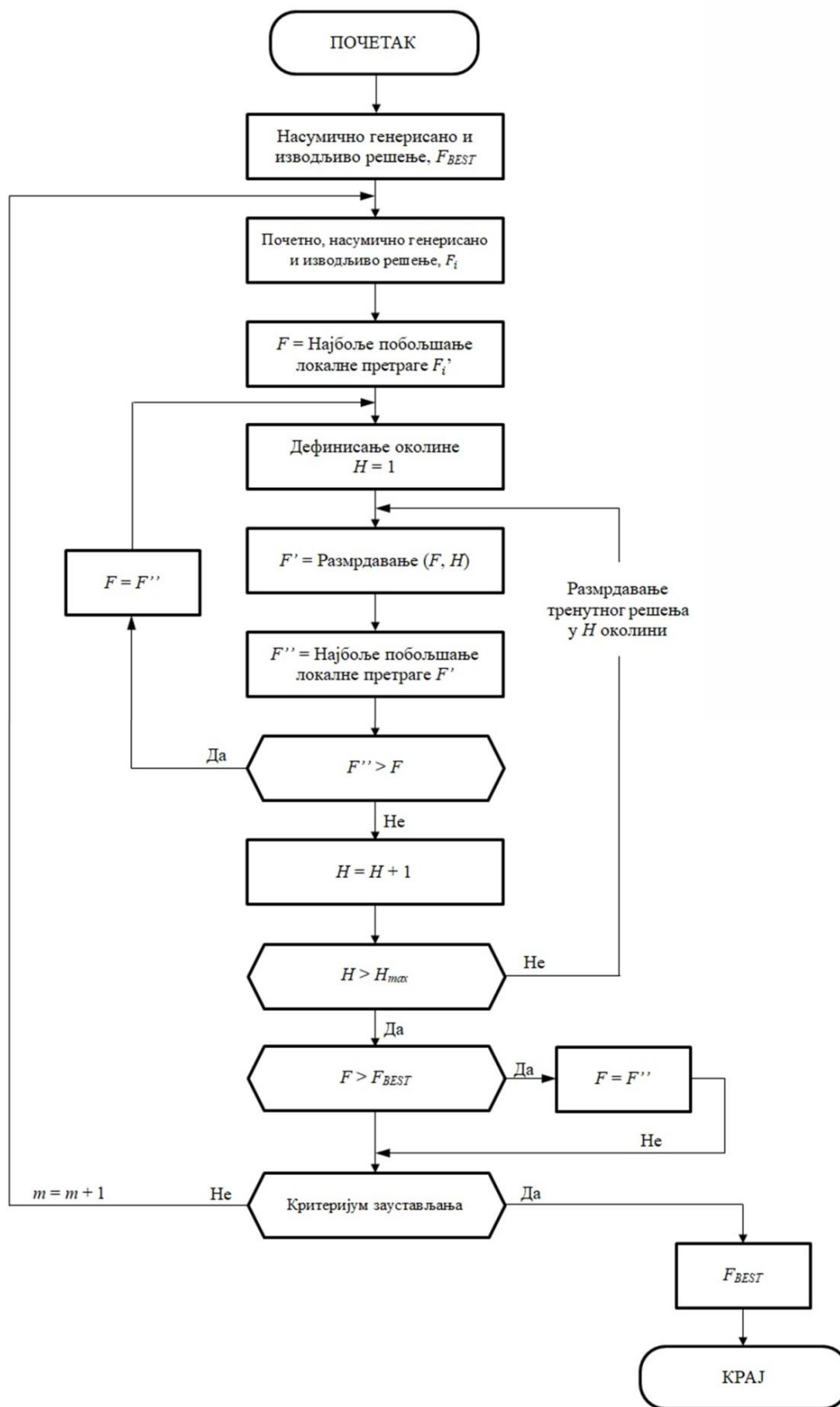
Околина 5: убацивање два елемента,

Околина 6: избацивање три елемента и

Околина 7: убацивање три елемента.

Приликом одређивања редоследа околина узета су у обзир два фактора, која описују разлику између тренутног решења и решења из одређене околине, а то су: 1) промена броја елемената у ранцу – V и Хемингова дистанца – H . Ови фактори се у дефинисаним околинама изражавају на следећи начин (*Komatina* и др., 2023):

- Околина 1: 0,2;
- Околина 2: 0,4;
- Околина 3: 0,6;
- Околина 4: 2,2;
- Околина 5: 2,2;
- Околина 6: 3,3;
- Околина 7: 3,3;



Слика 4.6 – Поступак примене Методе променљивих околине за решавање проблема избора скупа начина отказа (Коматина и др., 2023)

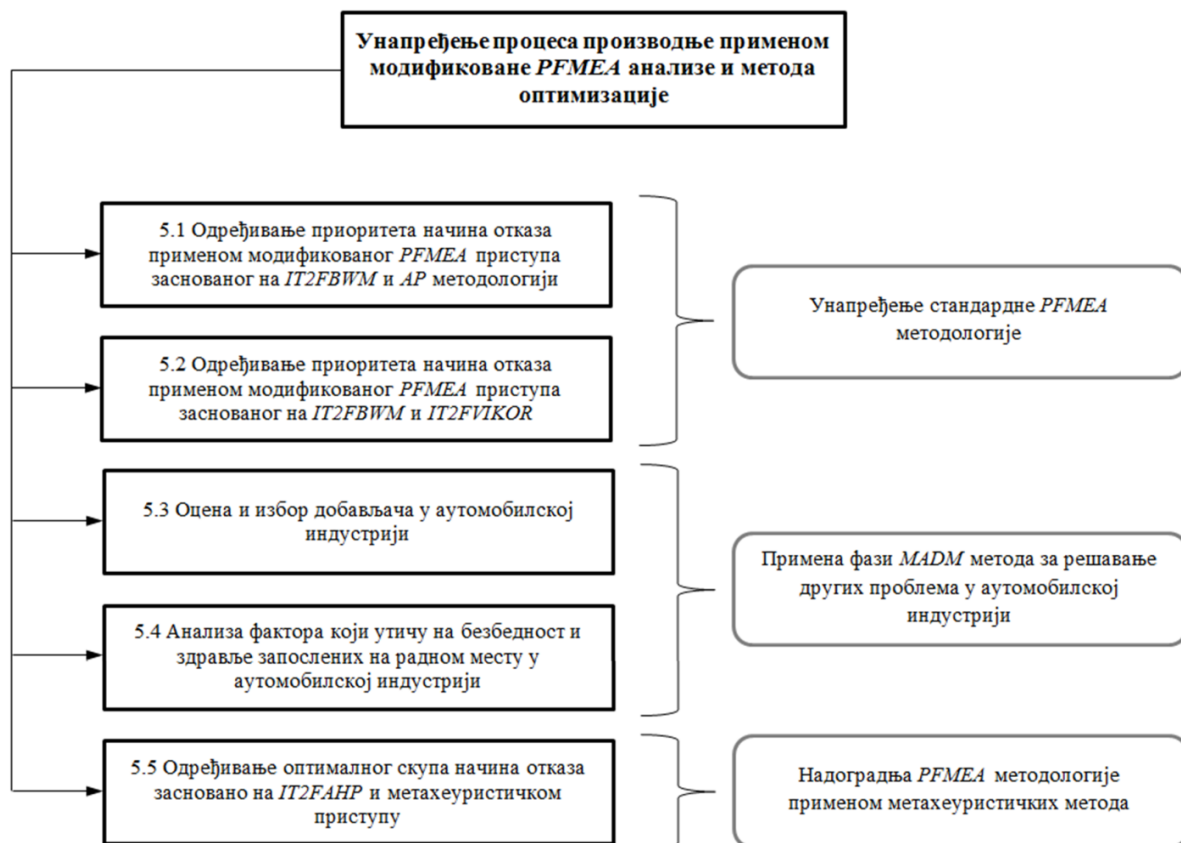
Као што се може и видети на слици 4.6, Метода променљивих околина је примењена да се дефинише оптималан скуп начина отказа, односно оних начина отказа који имају највећи утицај на ефикасност и поузданост процеса производње. Својства овог алгоритма се могу описати кроз следеће кораке (*Komatina* и др., 2023):

- 1) Насумично генерисано иницијално решење.
- 2) Почетно изводљиво решење се постиже локалном претрагом са најбољим побољшањем. Ово решење је тренутно најбоље решење.
- 3) У фази размрдавања околина, на случајан начин, бира се изводљиво решење у тренутној околини. Применом локалне претраге најбољег побољшања, побољшава се пронађено решење. У случају да је унапређено решење из тренутне околине боље од тренутно најбољег решења, узима се као ново најбоље решење и бројач околина се ресетује. У супротном, прелази се на следећу околину и понавља се претходни корак.

Важно је нагласити да је за критеријум заустављања дефинисан унапред одређен временски период. Локална претрага у овој имплементацији се врши претрагом свих решења на Хеминговом растојању вредности 1 од тренутног решења (*Komatina* и др., 2023).

5. СТУДИЈЕ СЛУЧАЈА

У оквиру овог поглавља представљене су студије случаја, спроведене на основу модела приказаних у претходном поглављу. Верификација спроведених студија случаја извршена је кроз пет публикација, односно пет радова објављених у часописима са *SCI* (енгл. *Science Citation Index*) листе (Komatina и др., 2021; Komatina и др., 2022a; Aleksić и др., 2023; Komatina и др., 2022b; Komatina и др., 2023). Другим речима, у сваком од ових радова представљена је по једна студија случаја. У циљу боље прегледности предложених приступа, графички приказ структуре овог поглавља је дат на слици 5.1.



Слика 5.1 – Предложени приступ за унапређење процеса производње применом модификоване PFMEA анализе и метода оптимизације

Спроведене студије случаја се, у зависности од њихове намене, могу поделити у три групе. Студије случаја приказане у потпоглављима 5.1 и 5.2 спроведене су са циљем да се унапреди стандардна PFMEA анализа, превасходно кроз елиминисање појединих недостатака стандардне методе. Након тога, кроз потпоглавља 5.3 и 5.4 извршена је примена фази MADM метода за решавање других проблема у аутомобилској индустрији. У овој дисертацији, разматран је проблем оцене и избора добављача, као и проблем анализе фактора који утичу на безбедност и здравље запослених на радном месту. У потпоглављу 5.5 представљен је нови приступ за одређивање приоритета, односно редоследа третирања начина отказа, применом метахеуристичких метода.

5.1 ОДРЕЂИВАЊЕ ПРИОРИТЕТА НАЧИНА ОТКАЗА ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНОГ *PFMEA* ПРИСТУПА ЗАСНОВАНОГ НА *IT2FBWM* И *AP* МЕТОДОЛОГИЈИ

Предложени модел приказан у потпоглављу 4.1 и надаље приказана студија случаја резултат су истраживања спроведеног у сарадњи са предузећем које је добављач првог реда у ланцу снабдевања у оквиру аутомобилске индустрије. Производни асортиман предузећа заснива се на производима од текстила и коже, који су саставни део ентеријера аутомобила. У истраживању су учествовали доносиоци одлука, тј. инжењери који су запослени у предузећу, као и *PFMEA* тим. Студија случаја и резултати истраживања приказани су у раду (*Komatina* и др., 2022а).

За потребе овог истраживања анализирана су три *PFMEA* извештаја (*Komatina* и др., 2022а):

- 1) са финалне линије контроле квалитета,
- 2) са контроле квалитета производа током реализације процеса производње и
- 3) из процеса планирања, наручивања и контроле улазног материјала.

Интервју са члановима *PFMEA* тима и инжењерима (доносиоцима одлука) обављен је одвојено и то у просторијама предузећа. Задатак *PFMEA* тима био је да изврши процену вредности фактора ризика *S*, *O* и *D* за сваки претходно идентификовани начин отказа. С друге стране, инжењери су имали задатак да процене релативну важност аспекта фактора ризика *S* (квалитет, важност производа и трошкови). И *PFMEA* тим и инжењери предузећа су користили унапред дефинисане лингвистичке исказе, који су претходно приказани у потпоглављу 4.1. Прикупљени подаци су надаље обрађени и анализирани у оквиру овог истраживања (*Komatina* и др., 2022а).

Предложени модел за процену и рангирање начина отказа у потпоглављу 4.1 приказан је поступно на примеру *PFMEA* анализе урађеној на финалној линији контроле квалитета. За остала два *PFMEA* извештаја дати су искључиво добијени резултати. Приоритет, тј. ранг начина отказа, одређен је применом предложене процедуре, која је дефинисана у раду (*Komatina* и др., 2022а):

Према развијеној процедури (*Корак 1* предложеног алгоритма), израчунати су *FBO* и *FOW*, на основу процена доносилаца одлука:

$$\tilde{A}_B^1 = (R1, R2, R4)$$

$$\tilde{A}_B^2 = (R1, R3, R4)$$

$$\tilde{A}_B^3 = (R1, R2, R3)$$

$$\tilde{A}_W^1 = (R4, R3, R1)^T$$

$$\tilde{A}_W^2 = (R4, R2, R1)^T$$

$$\tilde{A}_W^3 = (R3, R3, R1)^T$$

Агрегирана вредност *FBO* и агрегирана вредност *FOW*, одређена је на следећи начин (*Корак 2* предложеног алгоритма):

$$\tilde{A}_B = \begin{pmatrix} ((1, 1, 1, 1; 1, 1)(1, 1, 1, 1; 0.75, 0.75)), \\ ((1.5, 2.2, 3.2, 6.2; 1, 1)(1.7, 2.2, 3.2, 5.7; 0.75, 0.75)), \\ ((3.8, 6.8, 7.8, 8.5; 1, 1)(4.3, 6.8, 7.8, 8.3; 0.75, 0.75)) \end{pmatrix}$$

$$\tilde{A}_W = \begin{pmatrix} ((3.8, 6.8, 7.8, 8.5; 1, 1)(4.3, 6.8, 7.8, 8.3; 0.75, 0.75)), \\ ((2, 3.3, 4.3, 6.8; 1, 1)(2.3, 3.3, 4.3, 6.3; 0.75, 0.75)), \\ ((1, 1, 1, 1; 1, 1)(1, 1, 1, 1; 0.75, 0.75)) \end{pmatrix}^T$$

Применом процедуре дефазификације, дефинисане од стране аутора *Ayyildiz, Gumus* и *Erkan* (2020), агрегиране вредности *FBO* и *FWO* су трансформисане у *crisp* вредности (Корак 3 предложеног алгоритма):

$$A_B = (0.87, 2.83, 5.92)$$

$$A_W = (5.92, 3.57, 0.87)^T$$

Функција циља:

$$\min \max_{j=1, \dots, J} \left\{ \left| \frac{\omega_1}{\omega_k} - a_{1k} \right|, \left| \frac{\omega_k}{\omega_3} - a_{k3} \right| \right\}$$

при чему важе услови да:

$$\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$$

$$\omega_k \geq 0, k = 1, \dots, K$$

Приказани математички модел се може трансформисати и представити као проблем линеарног програмирања:

Функција циља:

$$\min \varphi$$

при чему важе услови да:

$$\left| \frac{\omega_1}{\omega_2} - 2.83 \right| \leq \varphi$$

$$\left| \frac{\omega_1}{\omega_3} - 5.92 \right| \leq \varphi$$

$$\left| \frac{\omega_2}{\omega_3} - 3.57 \right| \leq \varphi,$$

$$\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$$

$$\omega_k \geq 0, k = 1, \dots, K$$

Вектори тежина аспеката фактора ризика S су израчунати на основу постављеног модела линеарног програмирања (*Корак 4* предложеног алгорита):

$$\omega_1 = 0.66$$

$$\omega_2 = 0.23$$

$$\omega_3 = 0.11$$

Однос конзистентности (енгл. *Consistency Ratio*, скр. *CR*) је израчунат према процедури развијеној у конвенционалној *BWM* методи (*Rezaei, 2015*) и износи (*Корак 5* предложеног алгорита):

$$CR = \frac{0.27}{3.00} = 0.09$$

Дакле, може се сматрати да је вредност *CR* сасвим задовољавајућа.

Процена вредности фактора ризика S за сваки аспект је извршена за финалну линију контроле квалитета, према предложеном алгориту (*Корак 6* и *Корак 7*). Такође, процењене вредности фактора ризика O и D дате су у табели 5.1 (*Komatina* и др., 2022a).

Табела 5.1 – Улазни подаци (израчунате вредности и процене вредности фактора ризика S , O и D) са финалне линије контроле квалитета (*Komatina* и др., 2022a)

Бр. начина отказа	Потенцијални начин отказа	Потенцијални ефекат	S			O	D
			Важност производа	Квалитет	Трошкови		
$i = 1$	Карактеристике дате у безбедносном листу (<i>SDS</i>) нису у складу са дефинисаним захтевима (мерне тачке за шивење предњег наслона према безбедносном листу).	Производ није у складу са захтевима купаца.	$S9$	3	$S6$	5	3
$i = 2$	Карактеристике дате у безбедносном листу (<i>SDS</i>) нису у складу са дефинисаним захтевима (мерне тачке за шивење задњег <i>HV</i> јастука према безбедносном листу).	Производ није у складу са захтевима купаца.	$S8$	3	$S7$	3	3
$i = 3$	Маса није према вредности која је дата на техничком цртежу.	Производ није у складу са захтевима купаца.	$S4$	3	$S4$	3	2
$i = 4$	Неадекватна визуелна провера дела.	Производ није у складу са захтевима купаца или је део добар, али одбачен.	$S4$	2	$S4$	7	2

Табела 5.1 (наставак) – Улазни подаци (израчунате вредности и процене вредности фактора ризика S , O и D) са финалне линије контроле квалитета (*Komatina* и др., 2022а)

Бр. начина отказа	Потенцијални начин отказа	Потенцијални ефекат	S			O	D
			Важност производа				
$i = 5$	Недостаје или је погрешно постављен <i>tuck pin</i> .	Може да испадне жица за инсталацију и онемогући инсталирање пресвлаке.	$S4$	1	$S2$	9	9
$i = 6$	Помешани делови.	Недовољан број делова у кутији.	$S7$	3	$S1$	8	3
$i = 7$	Неадекватан начин паковања.	Оштећење делова током транспорта.	$S7$	3	$S2$	6	2

Агрегација вредности фактора ризика S , узимајући у обзир сва три аспекта (*Корак 8* предложеног алгоритма), приказан је за начин отказа $i = 1$:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 = & ((10, 10, 10, 10; 1, 1), (10, 10, 10, 10; 0.85, 0.85)) \cdot 0.66 + \\ & ((3, 3, 3, 3; 1, 1), (3, 3, 3, 3; 0.85, 0.85)) \cdot 0.23 + \\ & ((1, 2, 3, 4; 1, 1), (1.5, 2, 3, 3.5; 0.85, 0.85)) \cdot 0.11 \\ \tilde{S}_1 = & ((8.01, 8.12, 8.23, 8.34; 1, 1), (8.06, 8.12, 8.23, 8.28; 0.85, 0.85)) \end{aligned}$$

Према *Кораку 9* предложеног алгоритма израчунати су репрезентативни скалари. Тако је репрезентативни скалар за \tilde{S}_1 , $S_1 = 8$.

Вредност фактора ризика S за сваки начин отказа је израчунат на исти начин. Добијени резултати су приказани у табели 5.2 (*Komatina* и др., 2022а). У *PFMEA* анализи, према (*AIAG&VDA*, 2019), фактор ризика S се разматра само са аспекта квалитета и у одређеној мери са аспекта безбедности. У овом истраживању су усвојени додатни аспекти фактора ризика S , односно важност производа и трошкови. Постојање разлике између израчунатих вредности фактора ризика S применом процедура предложених кроз *AP* (*AIAG&VDA*, 2019) и кроз предложени модел приказано је у табели 5.2 (*Komatina* и др., 2022а).

Табела 5.2 – Фактор ризика S за разматране начине отказа (*Komatina* и др., 2022а)

Бр. начина отказа	Фази вредност фактора ризика S	<i>Crisp</i> вредност фактора ризика S израчуната према предложеној процедури	Промена вредности у односу на <i>AP</i>
$i = 1$	$\tilde{S}_1 = ((6.36, 7.46, 8.23, 8.34; 1, 1), (6.74, 7.46, 8.23, 8.28; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 2$	$\tilde{S}_2 = ((6.36, 7.46, 8.23, 8.34; 1, 1), (6.74, 7.46, 8.23, 8.28; 0.8, 0.8))$	7	Да
$i = 3$	$\tilde{S}_3 = ((2.62, 3.39, 4.16, 4.93; 1, 1), (3.00, 3.39, 4.16, 4.54; 0.8, 0.8))$	3	Не
$i = 4$	$\tilde{S}_4 = ((2.39, 3.16, 3.93, 4.70; 1, 1), (2.77, 3.16, 3.93, 4.31; 0.8, 0.8))$	3	Не

Табела 5.2 (наставкак) – Фактор ризика S за разматране начине отказа (*Komatina* и др., 2022a)

Бр. начина отказа	Фази вредност фактора ризика S	<i>Crisp</i> вредност фактора ризика S израчуната према предложеној процедури	Промена вредности у односу на AP
$i = 5$	$\tilde{s}_5 = ((1.99, 2.65, 3.42, 4.25; 1,1), (2.32, 2.65, 3.42, 3.82; 0.8,0.8))$	3	Да
$i = 6$	$\tilde{s}_6 = ((5.09, 5.75, 6.52, 7.35; 1,1), (5.42, 5.75, 6.52, 6.96; 0.8,0.8))$	6	Да
$i = 7$	$\tilde{s}_7 = ((5.09, 5.75, 6.52, 7.35; 1,1), (5.42, 5.75, 6.52, 6.96; 0.8,0.8))$	6	Да

Као што је и приказано у табели 5.2, вредност фактора ризика S за готово све начине отказа је промењен у односу на првобитне вредности, где је у обзир узет само аспект квалитета. Једино се вредност фактора ризика S није променила у случају начина отказа $i = 3$ и $i = 4$. Важно питање је то да ли промена вредности фактора ризика S доводи до промене приоритета разматраног начина отказа. Како би се испитала ова претпоставка, примењена је AP методологија, где су у обзир узете вредности S , добијене предложеним поступком. Такође, извршено је поређење приоритета начина отказа за ова два случаја, што је и представљено у табели 5.3 (*Komatina* и др., 2022a).

Табела 5.3 – Поређење приоритета начина отказа када се у обзир узимају три аспекта фактора ризика S и када се у обзир узима само аспект квалитета (*Komatina* и др., 2022a)

Бр. начина отказа	Приоритет начина отказа одређен примерном AP методологије са респектовањем три аспекта фактора ризика S	Приоритет начина отказа одређен примерном AP методологије са респектовањем само аспекта квалитета фактора ризика S
$i = 1$	M	L
$i = 2$	L	L
$i = 3$	L	L
$i = 4$	L	L
$i = 5$	M	L
$i = 6$	M	L
$i = 7$	M	L

Као што се и може видети у табели 5.3, приоритет начина отказа се разликује за $i = 1$, $i = 5$, $i = 6$ и $i = 7$. То заправо показује да промена вредности фактора ризика S може имати утицај и на коначан приоритет начина отказа. Кроз табеле 5.4 до 5.7 приказани су резултати добијени за контролу квалитета производа током реализације процеса производње и за процес планирања, наручивања и контроле улазног материјала. У наведеним табелама дате су потенцијалне разлике у вредностима фактора ризика S , када се разматрају три аспекта или само аспект квалитета, као и разлика у коначном приоритету начина отказа. Више информација о ова два $PFMEA$ извештаја се може пронаћи у раду (*Komatina* и др., 2022a), односно у *Прилогу 2* наведеног рада.

Табела 5.4 – Фактор ризика S за разматране начине отказа (контрола квалитета производа током реализације процеса производње) (Komatina и др., 2022a)

Бр. начина отказа	Фази вредност фактора ризика S	<i>Crisp</i> вредност фактора ризика S израчуната према предложеној процедури	Промена вредности у односу на AP
$i = 1$	$\tilde{s}_1 = ((1.69, 1.80, 2.57, 3.67; 1, 1), (1.75, 1.80, 2.57, 3.29; 0.8, 0.8))$	2	Да
$i = 2$	$\tilde{s}_2 = ((1.69, 1.80, 2.57, 3.67; 1, 1), (1.75, 1.80, 2.57, 3.29; 0.8, 0.8))$	2	Да
$i = 3$	$\tilde{s}_3 = ((5.42, 6.19, 6.96, 7.73; 1, 1), (5.81, 6.19, 6.96, 7.35; 0.8, 0.8))$	7	Да
$i = 4$	$\tilde{s}_4 = ((5.42, 6.19, 6.96, 7.73; 1, 1), (5.81, 6.19, 6.96, 7.35; 0.8, 0.8))$	6	Да
$i = 5$	$\tilde{s}_5 = ((4.40, 5.17, 5.94, 6.71; 1, 1), (4.78, 5.17, 5.94, 6.32; 0.8, 0.8))$	5	Не
$i = 6$	$\tilde{s}_6 = ((4.40, 5.17, 5.94, 6.71; 1, 1), (4.78, 5.17, 5.94, 6.32; 0.8, 0.8))$	6	Не
$i = 7$	$\tilde{s}_7 = ((3.52, 4.29, 5.06, 5.83; 1, 1), (3.90, 4.29, 5.06, 5.44; 0.8, 0.8))$	4	Не
$i = 8$	$\tilde{s}_8 = ((2.68, 3.34, 4.11, 4.94; 1, 1), (3.01, 3.34, 4.11, 4.55; 0.8, 0.8))$	3	Да
$i = 9$	$\tilde{s}_9 = ((2.45, 3.22, 3.99, 4.76; 1, 1), (2.84, 3.22, 3.99, 4.38; 0.8, 0.8))$	3	Не
$i = 10$	$\tilde{s}_{10} = ((3.63, 4.45, 5.22, 5.88; 1, 1), (4.01, 4.45, 5.22, 5.55; 0.8, 0.8))$	4	Не
$i = 11$	$\tilde{s}_{11} = ((6.60, 7.70, 8.47, 8.58; 1, 1), (6.98, 7.70, 8.47, 8.52; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 12$	$\tilde{s}_{12} = ((6.60, 7.70, 8.47, 8.58; 1, 1), (6.98, 7.70, 8.47, 8.52; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 13$	$s_{13} = ((6.21, 7.31, 8.08, 8.19; 1, 1), (6.60, 7.31, 8.08, 8.14; 0.8, 0.8))$	7	Да
$i = 14$	$\tilde{s}_{14} = ((6.21, 7.31, 8.08, 8.19; 1, 1), (6.60, 7.31, 8.08, 8.14; 0.8, 0.8))$	7	Да
$i = 15$	$\tilde{s}_{15} = ((4.23, 5.00, 5.77, 6.54; 1, 1), (4.62, 5.00, 5.77, 6.16; 0.8, 0.8))$	5	Не
$i = 16$	$\tilde{s}_{16} = ((1.91, 3.89, 7.43, 14.66; 1, 1), (1.26, 3.89, 7.43, 13.52; 0.8, 0.8))$	5	Не
$i = 17$	$\tilde{s}_{17} = ((1.92, 2.69, 3.46, 4.23; 1, 1), (2.31, 2.69, 3.46, 3.85; 0.8, 0.8))$	3	Да

Табела 5.5 – Поређење приоритета начина отказа када се у обзир узимају три аспекта фактора ризика S и када се у обзир узима само аспект квалитета (контрола квалитета производа током реализације процеса производње) (Komatina и др., 2022a)

Бр. начина отказа	Приоритет начина отказа одређен примерном AP методологије са респектовањем три аспекта фактора ризика S	Приоритет начина отказа одређен примерном AP методологије са респектовањем само аспекта квалитета фактора ризика S
$i = 1$	L	L
$i = 2$	L	L
$i = 3$	L	L
$i = 4$	L	L
$i = 5$	L	L
$i = 6$	M	M
$i = 7$	L	L
$i = 8$	L	L
$i = 9$	L	L
$i = 10$	L	L
$i = 11$	L	L
$i = 12$	L	L
$i = 13$	M	M
$i = 14$	L	L
$i = 15$	L	L
$i = 16$	L	L
$i = 17$	L	L

Табела 5.6 – Фактор ризика S за разматране начине отказа (процес планирања, наручивања и контроле улазног материјала) (Komatina и др., 2022a)

Бр. начина отказа	Фази вредност фактора ризика S	Crisp вредност фактора ризика S израчуната према предложеној процедури	Промена вредности у односу на AP
$i = 1$	$\tilde{S}_1 = ((5.65, 6.42, 7.19, 7.96; 1, 1), (6.04, 6.42, 7.19, 7.58; 0.8, 0.8))$	7	Да
$i = 2$	$\tilde{S}_2 = ((6.50, 7.27, 8.04, 8.81; 1, 1), (6.88, 7.27, 8.04, 8.42; 0.8, 0.8))$	7	Да
$i = 3$	$\tilde{S}_3 = ((6.54, 7.31, 8.08, 8.85; 1, 1), (6.93, 7.31, 8.08, 8.47; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 4$	$\tilde{S}_4 = ((6.50, 7.27, 8.04, 8.81; 1, 1), (6.88, 7.27, 8.04, 8.42; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 5$	$\tilde{S}_5 = ((6.72, 7.49, 8.26, 9.03; 1, 1), (7.10, 7.49, 8.26, 8.64; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 6$	$\tilde{S}_6 = ((6.49, 7.26, 8.03, 8.80; 1, 1), (6.87, 7.26, 8.03, 8.41; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 7$	$\tilde{S}_7 = ((6.83, 7.65, 8.42, 9.08; 1, 1), (7.21, 7.65, 8.42, 8.75; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 8$	$\tilde{S}_8 = ((6.83, 7.65, 8.42, 9.08; 1, 1), (7.21, 7.65, 8.42, 8.75; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 9$	$\tilde{S}_9 = ((6.60, 7.42, 8.19, 8.85; 1, 1), (6.98, 7.42, 8.19, 8.19; 0.8, 0.8))$	8	Да
$i = 10$	$\tilde{S}_{10} = ((7.75, 8.57, 9.34, 10.00; 1, 1), (8.13, 8.57, 9.34, 9.67; 0.8, 0.8))$	9	Не
$i = 11$	$\tilde{S}_{11} = ((7.69, 8.46, 9.23, 10.00; 1, 1), (8.08, 8.46, 9.23, 9.62; 0.8, 0.8))$	9	Не
$i = 12$	$\tilde{S}_{12} = ((6.54, 7.31, 8.08, 8.85; 1, 1), (6.93, 7.31, 8.08, 8.47; 0.8, 0.8))$	8	Да

Табела 5.7 – Поређење приоритета начина отказа када се у обзир узимају три аспекта фактора ризика S и када се у обзир узима само аспект квалитета (процес планирања, наручивања и контроле улазног материјала) (Komatina и др., 2022a)

Бр. начина отказа	Приоритет начина отказа одређен примерном AP методологије са респектовањем три аспекта фактора ризика S	Приоритет начина отказа одређен примерном AP методологије са респектовањем само аспекта квалитета фактора ризика S
$i = 1$	L	L
$i = 2$	L	L
$i = 3$	M	L
$i = 4$	L	L
$i = 5$	L	L
$i = 6$	L	L
$i = 7$	M	L
$i = 8$	L	L
$i = 9$	M	L
$i = 10$	L	L
$i = 11$	M	M
$i = 12$	L	L

На основу анализе приказана три $PFMEA$ извештаја јасно се може закључити да се, у великом броју случајева, вредност фактора ризика S разликује у зависности од тога да ли се посматра само аспект квалитета или се додају и два нова аспекта (важност производа и трошкови). Међутим, промена приоритета начина отказа се не мења толико често, јер приоритет зависи и од остала два фактора ризика (O и D). Међутим, промена приоритета начина отказа јавља се у два од три анализирана $PFMEA$ извештаја, и то за финалну линију контроле квалитета и за процес планирања, наручивања и контроле улазног материјала (Komatina и др., 2022a).

На основу утврђеног приоритета начина отказа, менаџмент и/или *PFMEA* тим треба да утврди редослед спровођења одговарајућих иницијатива, које треба да доведу до отклањања њиховог утицаја или смањења њиховог укупног приоритета. Заправо, један од проблема који се често јавља у пракси јесте ограничен буџет. Стога је важно да се расположива новчана средства утроше тако да се спроведу иницијативе које ће у што већој мери повећати поузданост процеса производње. У два од три *PFMEA* извештаја приоритет начина отказа се мења у случају када се фактор ризика S разматра са три аспекта. У овим случајевима, начини отказа ниског приоритета (L) постали су начини отказа средњег приоритета (M), што заправо значи да се од менаџмента и/или *PFMEA* тима захтева да анализира ове начине отказа и да се према потреби и могућностима предузму одговарајуће иницијативе. У првобитном случају, тј. када се фактор ризика S посматра само са аспекта квалитета, ови начини отказа били би третирано као и остали начини отказа ниског приоритета, па тако за њих готово сигурно не би биле предузете никакве иницијативе (*Komatina* и др., 2022а).

Представљени приступ има значајна унапређења у односу на традиционални, али се може рећи да овакав приступ има и одређене недостатке. Најважнији доприноси модификованог *PFMEA* приступа су (*Komatina* и др., 2022а):

- Укључивање нова два аспекта фактора ризика S , тачније разматрани су аспекти важност производа и трошкови. На студији случаја је показано да увођење ових аспеката може утицати на промену укупне вредности S , као и на укупан приоритет разматраног начина отказа;
- Моделовање постојећих неизвесности и непрецизности при одређивању релативне важности аспеката фактора ризика S извршено је применом *IT2TrFNs*;
- Вектори тежина аспеката фактора ризика S су одређени применом *IT2FBWM*, што има одређене предности у односу на примеру *IT2FAHP*, превасходно у погледу практичне примене модела у индустрији;
- Агрегирана вредност фактора ризика S се израчунава према правилима фази алгебре, а затим трансформише у облик који одговара конвенционалном, односно, у овом случају, *AP* оквиру;
- Приоритет начина отказа се одређује према *AP* методологији, чиме се обезбеђује адаптивност модела новом *FMEA Handbook*-у (*AIAG&VDA*, 2019).

Основни недостаци и ограничења предложеног приступа су (*Komatina* и др., 2022а):

- Примена предложеног модела у великој мери зависи од знања и искуства доносилаца одлука. Посебно се то односи на процену релативне важности и вредности аспеката важности производа и трошкова;
- Субјективност доносилаца одлука је у великој мери изражена приликом процена релативне важности аспеката фактора ризика S , као и приликом процене њихове вредности за сваки разматрани начин отказа;
- Предложени модел је комплекснији у погледу прорачуна.

Како би се утицај наведених недостатака и/или ограничења смањило или потпуно елиминисао, правци будућих истраживања треба да се односе на (*Komatina* и др., 2022а): 1) развој софтверског решења које би омогућило аутоматизацију предложеног *PFMEA* приступа и 2) увођење додатних аспеката фактора ризика S .

5.2 ОДРЕЂИВАЊЕ ПРИОРИТЕТА НАЧИНА ОТКАЗА ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНОГ *PFMEA* ПРИСТУПА ЗАСНОВАНОГ НА *IT2FBWM* И *IT2FVIKOR*

У оквиру овог потпоглавља је представљена студија случаја заснована на моделу приказаном у потпоглављу 4.2. Тестирање предложеног модела је извршено на реалним подацима који потичу из предузећа које је кооперант оригиналног произвођача опреме, односно добављач првог реда у ланцу снабдевања. Разматрано предузеће се бави производњом текстилних компонената ентеријера аутомобила, попут патосница, пресвлака за седишта, као и друге ауто и додатне опреме од текстила и коже. Резултати студије случаја публиковани су кроз рад (*Aleksić* и др., 2023).

Подаци неопходни за спровођење овог истраживања су добијени на основу два упитника. Први упитник садржи унапред дефинисане лингвистичке исказе који су коришћени за процену релативне важности фактора ризика. Упитник је послат електронском поштом следећим доносиоцима одлука: 1) менаџеру производње, 2) менаџеру квалитета, 3) финансијском менаџеру, 4) менаџеру логистике и 5) менаџеру одржавања. Други упитник садржи *PFMEA* извештај, проширен са трошковним аспектом фактора ризика *S*. Осим тога, упитник садржи и унапред дефинисане лингвистичке исказе које су доносиоци одлука користили при процени вредности фактора ризика за сваки разматрани начин отказа. Као и први упитник, доносиоцима одлука је овај упитник прослеђен електронском поштом. На исти начин, доносиоци одлука су послали своје одговоре (*Aleksić* и др., 2023).

Разматрана студија случаја је подељена на два дела. У првом делу је применом *IT2FBWM* методе одређена релативна важност фактора ризика, док је у другом делу извршено рангирање начина отказа применом *IT2FVIKOR* методе. Одређивање релативне важности фактора ризика извршено је на следећи начин (*Aleksić* и др., 2023):

Донесиоци одлука су релативну важност фактора ризика процењивали сходно правилима *BWM* методе, користећи унапред дефинисане лингвистичке исказе, који су моделовани применом *IT2TFNs* (*Корак 1* првог дела предложеног алгоритма):

$$\begin{aligned} A_B^1 &= [W1 \ W2 \ W4 \ W5] & A_B^2 &= [W1 \ W1 \ W3 \ W3] & A_B^3 &= [W1 \ W3 \ W5 \ W6] \\ A_W^1 &= [W5 \ W4 \ W3 \ W1]^T & A_W^2 &= [W5 \ W6 \ W3 \ W1]^T & A_W^3 &= [W5 \ W3 \ W3 \ W1]^T \\ \\ A_B^4 &= [W1 \ W2 \ W4 \ W5] & A_B^5 &= [W1 \ W2 \ W2 \ W1] \\ A_W^4 &= [W5 \ W5 \ W2 \ W1]^T & A_W^5 &= [W5 \ W3 \ W1 \ W1]^T \end{aligned}$$

Агрегација процена доносилаца одлука је извршена применом оператора фази геометријске средине. Стога, агрегиране вредности *FBO* и *FOW* су израчунате на следећи начин (*Корак 2* првог дела предложеног алгоритма):

$$\tilde{A}_B = \begin{pmatrix} ((1,1,1; 1), (1,1,1; 0.9)) \\ ((1.15,1.95,2.67; 1), (1.53,1.95,2.34; 0.9)) \\ ((2.76,4.37,5.81; 1), (3.34,4.37,5.26; 0.9)) \\ ((3.23,4.46,5.16; 1), (3.55,4.46,4.93; 0.9)) \end{pmatrix}$$

$$\tilde{A}_W = \begin{pmatrix} ((3.23, 4.46, 5.16; 1), (3.55, 4.46, 4.93; 0.9)) \\ ((3.54, 5.39, 6.77; 1), (4.10, 5.39, 6.32; 0.9)) \\ ((1.12, 2.44, 3.27; 1), (1.88, 2.44, 2.96; 0.9)) \\ ((1, 1, 1; 1), (1, 1, 1; 0.9)) \end{pmatrix}^T$$

Применом предложене *IT2FBWM* процедуре (од *Корак 3* до *Корак 4* првог дела предложеног алгорита), тежине разматраних фактора ризика се могу одредити на следећи начин:

Функција циља:

$$\min \varphi$$

при чему важе услови да:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\omega_{11}^U}{\omega_{12}^U} - 1.15 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{21}^U}{\omega_{22}^U} - 1.95 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{31}^U}{\omega_{32}^U} - 2.67 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{11}^L}{\omega_{12}^L} - 1.53 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{31}^L}{\omega_{32}^L} - 2.34 \right| \leq \varphi \\ \left| \frac{\omega_{11}^U}{\omega_{13}^U} - 2.76 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{21}^U}{\omega_{23}^U} - 4.37 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{31}^U}{\omega_{33}^U} - 5.89 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{11}^L}{\omega_{13}^L} - 3.34 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{31}^L}{\omega_{33}^L} - 5.26 \right| \leq \varphi \\ \left| \frac{\omega_{11}^U}{\omega_{14}^U} - 3.23 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{21}^U}{\omega_{24}^U} - 4.46 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{31}^U}{\omega_{34}^U} - 5.16 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{11}^L}{\omega_{14}^L} - 3.55 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{31}^L}{\omega_{34}^L} - 4.93 \right| \leq \varphi \\ \left| \frac{\omega_{12}^U}{\omega_{14}^U} - 3.54 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{22}^U}{\omega_{24}^U} - 5.39 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{32}^U}{\omega_{34}^U} - 6.77 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{12}^L}{\omega_{14}^L} - 4.10 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{32}^L}{\omega_{34}^L} - 6.32 \right| \leq \varphi \\ \left| \frac{\omega_{13}^U}{\omega_{14}^U} - 1.12 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{23}^U}{\omega_{24}^U} - 2.44 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{33}^U}{\omega_{34}^U} - 3.27 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{13}^L}{\omega_{14}^L} - 1.88 \right| \leq \varphi & \quad \left| \frac{\omega_{33}^L}{\omega_{34}^L} - 2.96 \right| \leq \varphi \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\sum z_{ik}^U \cdot \mu_{1s}}{\sum \mu_{1s}} + \frac{\sum z_{ik}^L \cdot \mu_{2s}}{\sum \mu_{2s}} \right) = 1$$

$$\begin{aligned} \omega_{11}^U &\leq \omega_{11}^L & \omega_{12}^U &\leq \omega_{12}^L & \omega_{13}^U &\leq \omega_{13}^L & \omega_{14}^U &\leq \omega_{14}^L \\ \omega_{31}^L &\leq \omega_{31}^U & \omega_{32}^L &\leq \omega_{32}^U & \omega_{33}^L &\leq \omega_{33}^U & \omega_{34}^L &\leq \omega_{34}^U \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{11}^U &\leq \omega_{21}^U \leq \omega_{31}^U & \omega_{11}^L &\leq \omega_{21}^L \leq \omega_{31}^L \\ \omega_{12}^U &\leq \omega_{22}^U \leq \omega_{32}^U & \omega_{12}^L &\leq \omega_{22}^L \leq \omega_{32}^L \\ \omega_{13}^U &\leq \omega_{23}^U \leq \omega_{33}^U & \omega_{13}^L &\leq \omega_{23}^L \leq \omega_{33}^L \\ \omega_{14}^U &\leq \omega_{24}^U \leq \omega_{34}^U & \omega_{14}^L &\leq \omega_{24}^L \leq \omega_{34}^L \end{aligned}$$

$$\omega_{11}^U \geq 0 \quad \omega_{12}^U \geq 0 \quad \omega_{13}^U \geq 0 \quad \omega_{14}^U \geq 0$$

Вектори тежина фактора ризика су:

$$\tilde{\omega}_1 = ((0.10, 0.50, 0.54; 1), (0.19, 0.50, 0.53; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_2 = ((0.26, 0.29, 0.29; 1), (0.26, 0.29, 0.29; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_3 = ((0.12, 0.14, 0.14; 1), (0.13, 0.14, 0.14; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_4 = ((0.07, 0.07, 0.07; 1), (0.07, 0.07, 0.07; 0.75))$$

Провера конзистентности је извршена према процедури из конвенционалне *BWM* методе (Rezaei, 2015) и овај поступак је приказан у *Кораку 5* првог дела предложеног алгоритма. Као максимална могућа вредност \tilde{A}_{BW} узет је број $((3.54, 5.39, 6.77; 1), (4.10, 5.39, 6.32; 0.9))$, док је његова *crisp* вредност једнака 5.482. Оптимална вредност функције циља је $\delta^* = 0.209$. Стога, однос конзистентности, *CR*, се може израчунати на следећи начин:

$$CR = \frac{0.209}{5.482} = 0.038$$

Може се закључити да је вредност *CR* сасвим задовољавајућа. Стога, усвајају се израчунати вектори тежина фактора ризика.

Применом другог дела предложеног алгоритма одређује се ранг разматраних начина отказа, као што је и представљено у раду (Aleksić и др., 2023):

Превасходно, у *Кораку 1* другог дела предложеног алгоритма, дате су процене вредности фактора ризика, односно фази матрица одлучивања (табела 5.8).

Табела 5.8 – Процењене вредности фактора ризика (Aleksić и др., 2023)

Производ	Ред. бр.	Начин отказа	<i>k=1</i>	<i>k=2</i>	<i>k=3</i>	<i>k=4</i>
Производ 1	<i>i=1</i>	Пластична компонента ваздушног јастука на каишу је погрешно пришивена за поклопац.	<i>V2</i>	<i>V2</i>	<i>F2</i>	<i>V4</i>
	<i>i=2</i>	Прелаз конца изван каиша је краћи од 50 mm.	<i>V3</i>	<i>V4</i>	<i>F4</i>	<i>V2</i>
Производ 2	<i>i=3</i>	Погрешна дужина шава на каишу.	<i>V4</i>	<i>V3</i>	<i>F3</i>	<i>V2</i>
Производ 3	<i>i=4</i>	Погрешна ширина шава на каишу.	<i>V4</i>	<i>V3</i>	<i>F2</i>	<i>V1</i>
	<i>i=5</i>	Коришћење погрешног конца за шивење каиша (1).	<i>V4</i>	<i>V2</i>	<i>F2</i>	<i>V1</i>
	<i>i=6</i>	Коришћење погрешног конца за шивење каиша (2).	<i>V4</i>	<i>V2</i>	<i>F2</i>	<i>V2</i>
	<i>i=7</i>	Дорада каиша.	<i>V3</i>	<i>V2</i>	<i>F5</i>	<i>V3</i>
Производ 4	<i>i=8</i>	Дужина убода и ширина шава на каишевима нису у складу са спецификацијама.	<i>V3</i>	<i>V2</i>	<i>F2</i>	<i>V2</i>
	<i>i=9</i>	Дужина убода и ширина шава на ваздушним јастуцима нису у складу са спецификацијама.	<i>V3</i>	<i>V2</i>	<i>F2</i>	<i>V2</i>

Табела 5.8 (наставак) – Процењене вредности фактора ризика (*Aleksić* и др., 2023)

Производ	Ред. бр.	Начин отказа	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$
Производ 5	$i=10$	Погрешна ширина шава на каишу.	V2	V2	F2	V1
Производ 6	$i=11$	Карактеристике наведене у безбедносном листу нису у складу са дефинисаним захтевима (1).	V5	V2	F5	V1
	$i=12$	Карактеристике наведене у безбедносном листу нису у складу са дефинисаним захтевима (2).	V4	V3	F3	V2
	$i=13$	Карактеристике наведене у безбедносном листу нису у складу са дефинисаним захтевима (3).	V3	V3	F3	V2
Производ 7	$i=14$	Карактеристике наведене у безбедносном листу нису у складу са дефинисаним захтевима (1).	V2	V3	F2	V1
	$i=15$	Карактеристике наведене у безбедносном листу нису у складу са дефинисаним захтевима (2).	V2	V3	F2	V3
	$i=16$	Димензије нису у складу са толеранцијама.	V2	V2	F7	V2
	$i=17$	Маса дела није у складу са карактеристикама приказаним на цртежу.	V1	V2	F3	V1
	$i=18$	Неадекватна визуелна провера дела.	V2	V2	F2	V2
Производ 8	$i=19$	Недостаје или је погрешно постављена игла за увлачење конца.	V2	V1	F6	V5
	$i=20$	Измешани делови.	V3	V1	F3	V2
	$i=21$	Неадекватан начин паковања.	V3	V1	F3	V2

Отежана нормализована фази матрица одлучивања, као и фази позитивно, \tilde{z}_k^+ , и фази негативно идеално решење, \tilde{z}_k^- (од *Корак* 2 до *Корак* 4 другог дела предложеног алгоритма), приказани су у табели 5.9.

Табела 5.9 – Отежане вредности фактора ризика, као и фази позитивно и фази негативно идеално решење (*Aleksić* и др., 2023)

i	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$
$i=1$	$\left(\begin{array}{l} (0.015, 0.175, 0.297; 1), \\ (0.038, 0.175, 0.265; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.053, 0.067; 1), \\ (0.042, 0.053, 0.063; 0.75) \end{array} \right)$
$i=2$	$\left(\begin{array}{l} (0.035, 0.275, 0.404; 1), \\ (0.076, 0.275, 0.371; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.143, 0.218, 0.276; 1), \\ (0.156, 0.218, 0.261; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.036, 0.063, 0.084; 1), \\ (0.046, 0.063, 0.077; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=3$	$\left(\begin{array}{l} (0.055, 0.375, 0.513; 1), \\ (0.114, 0.375, 0.477; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.091, 0.160, 0.218; 1), \\ (0.104, 0.160, 0.203; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.024, 0.049, 0.070; 1), \\ (0.033, 0.049, 0.063; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=4$	$\left(\begin{array}{l} (0.055, 0.375, 0.513; 1), \\ (0.114, 0.375, 0.477; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.091, 0.160, 0.218; 1), \\ (0.104, 0.160, 0.203; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.007, 0.007, 0.018; 1), \\ (0.007, 0.007, 0.014; 0.75) \end{array} \right)$
$i=5$	$\left(\begin{array}{l} (0.055, 0.375, 0.513; 1), \\ (0.114, 0.375, 0.477; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.007, 0.007, 0.018; 1), \\ (0.007, 0.007, 0.014; 0.75) \end{array} \right)$
$i=6$	$\left(\begin{array}{l} (0.055, 0.375, 0.513; 1), \\ (0.114, 0.375, 0.477; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=7$	$\left(\begin{array}{l} (0.035, 0.275, 0.404; 1), \\ (0.076, 0.275, 0.371; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.060, 0.091, 0.112; 1), \\ (0.072, 0.091, 0.105; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.025, 0.039, 0.053; 1), \\ (0.028, 0.039, 0.099; 0.75) \end{array} \right)$
$i=8$	$\left(\begin{array}{l} (0.035, 0.275, 0.404; 1), \\ (0.076, 0.275, 0.371; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=9$	$\left(\begin{array}{l} (0.035, 0.275, 0.404; 1), \\ (0.076, 0.275, 0.371; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=10$	$\left(\begin{array}{l} (0.015, 0.175, 0.297; 1), \\ (0.038, 0.175, 0.265; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.007, 0.007, 0.018; 1), \\ (0.007, 0.007, 0.014; 0.75) \end{array} \right)$

Табела 5.9 (наставак) – Отежане вредности фактора ризика, као и фази позитивно и фази негативно идеално решење (*Aleksić* и др., 2023)

i	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
$i=11$	$\left(\begin{array}{l} (0.085, 0.500, 0.540; 1), \\ (0.171, 0.500, 0.530; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.060, 0.091, 0.112; 1), \\ (0.072, 0.091, 0.105; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.007, 0.007, 0.018; 1), \\ (0.007, 0.007, 0.014; 0.75) \end{array} \right)$
$i=12$	$\left(\begin{array}{l} (0.055, 0.375, 0.513; 1), \\ (0.114, 0.375, 0.477; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.091, 0.160, 0.218; 1), \\ (0.104, 0.160, 0.203; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.024, 0.049, 0.070; 1), \\ (0.033, 0.049, 0.063; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=13$	$\left(\begin{array}{l} (0.035, 0.275, 0.404; 1), \\ (0.076, 0.275, 0.371; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.091, 0.160, 0.218; 1), \\ (0.104, 0.160, 0.203; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.024, 0.049, 0.070; 1), \\ (0.033, 0.049, 0.063; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=14$	$\left(\begin{array}{l} (0.015, 0.175, 0.297; 1), \\ (0.038, 0.175, 0.265; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.091, 0.160, 0.218; 1), \\ (0.104, 0.160, 0.203; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.007, 0.007, 0.018; 1), \\ (0.007, 0.007, 0.014; 0.75) \end{array} \right)$
$i=15$	$\left(\begin{array}{l} (0.015, 0.175, 0.297; 1), \\ (0.038, 0.175, 0.265; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.091, 0.160, 0.218; 1), \\ (0.104, 0.160, 0.203; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.025, 0.039, 0.053; 1), \\ (0.028, 0.039, 0.099; 0.75) \end{array} \right)$
$i=16$	$\left(\begin{array}{l} (0.015, 0.175, 0.297; 1), \\ (0.038, 0.175, 0.265; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.102, 0.140, 0.140; 1), \\ (0.117, 0.140, 0.140; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=17$	$\left(\begin{array}{l} (0.00, 0.050, 0.135; 1), \\ (0.019, 0.050, 0.106; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.024, 0.049, 0.070; 1), \\ (0.033, 0.049, 0.063; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.007, 0.007, 0.018; 1), \\ (0.007, 0.007, 0.014; 0.75) \end{array} \right)$
$i=18$	$\left(\begin{array}{l} (0.015, 0.175, 0.297; 1), \\ (0.038, 0.175, 0.265; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.039, 0.102, 0.160; 1), \\ (0.052, 0.102, 0.145; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.012, 0.035, 0.056; 1), \\ (0.020, 0.035, 0.049; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=19$	$\left(\begin{array}{l} (0.015, 0.175, 0.297; 1), \\ (0.038, 0.175, 0.265; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.026, 0.029, 0.730; 1), \\ (0.026, 0.029, 0.580; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.084, 0.119, 0.140; 1), \\ (0.098, 0.119, 0.133; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.06, 0.07, 0.07; 1), \\ (0.06, 0.07, 0.07; 0.75) \end{array} \right)$
$i=20$	$\left(\begin{array}{l} (0.035, 0.275, 0.404; 1), \\ (0.076, 0.275, 0.371; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.026, 0.029, 0.730; 1), \\ (0.026, 0.029, 0.580; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.024, 0.049, 0.070; 1), \\ (0.033, 0.049, 0.063; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
$i=21$	$\left(\begin{array}{l} (0.035, 0.275, 0.404; 1), \\ (0.076, 0.275, 0.371; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.026, 0.029, 0.730; 1), \\ (0.026, 0.029, 0.580; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.024, 0.049, 0.070; 1), \\ (0.033, 0.049, 0.063; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.011, 0.025, 0.039; 1), \\ (0.014, 0.025, 0.035; 0.75) \end{array} \right)$
\tilde{z}_k^+	$\left(\begin{array}{l} (1, 1, 1; 1), \\ (1, 1, 1; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (1, 1, 1; 1), \\ (1, 1, 1; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (1, 1, 1; 1), \\ (1, 1, 1; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (1, 1, 1; 1), \\ (1, 1, 1; 0.75) \end{array} \right)$
\tilde{z}_k^-	$\left(\begin{array}{l} (0, 0, 0; 1), \\ (0, 0, 0; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0, 0, 0; 1), \\ (0, 0, 0; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0, 0, 0; 1), \\ (0, 0, 0; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0, 0, 0; 1), \\ (0, 0, 0; 0.75) \end{array} \right)$

Одређивање вредности групне корисности за сваки разматрани начин отказа, \tilde{S}_i (*Корак 5* другог дела предложеног алгоритма) и вредности индивидуалног одступања, \tilde{R}_i (*Корак 6* другог дела предложеног алгоритма), илустровано је примером за начин отказа $i = 1$:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 &= ((0.70, 0.83, 0.99; 1), (0.74, 0.83, 0.96; 0.75)) + ((0.84, 0.90, 0.96; 1), (0.86, 0.90, 0.95; 0.75)) + \\ &+ ((0.94, 0.97, 0.99; 1), (0.95, 0.97, 0.98; 0.75)) + ((0.93, 0.95, 0.96; 1), (0.94, 0.95, 0.96; 0.75)) = \\ &= ((3.41, 3.65, 3.90; 1), (3.49, 3.65, 3.85; 0.75)) \end{aligned}$$

Затим се одређује вероватноћа $p \left(\frac{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_{11}^U}{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_1^-} \geq \frac{\tilde{z}_2^+ - \tilde{z}_{12}^U}{\tilde{z}_2^+ - \tilde{z}_2^-} \right)$, где је:

$$\begin{aligned} \max \left\{ 1 - \max \left(\frac{\max(0.840 - 0.703, 0) + 2 \cdot \max(0.898 - 0.825, 0) + \max(0.961 - 0.985) + (0.961 - 0.703) + \max(1 - 1, 0) + \max(0.75 - 0.75, 0)}{|0.840 - 0.703| + 2 \cdot |0.898 - 0.825| + |0.961 - 0.985| + (0.961 - 0.840) + (0.985 - 0.703) + (1 - 1) + (0.75 - 0.75)}, 0 \right), 0 \right\} = \\ = 0.238 \end{aligned}$$

На сличан начин, одређује се вероватноћа $p \left(\frac{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_{11}^L}{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_1^-} \geq \frac{\tilde{z}_2^+ - \tilde{z}_{12}^L}{\tilde{z}_2^+ - \tilde{z}_2^-} \right)$, где је:

$$\begin{aligned} \max \left\{ 1 - \max \left(\frac{\max(0.855 - 0.735, 0) + 2 \cdot \max(0.898 - 0.825, 0) + \max(0.948 - 0.962) + (0.948 - 0.735) + \max(1 - 1, 0) + \max(0.75 - 0.75, 0)}{|0.855 - 0.735| + 2 \cdot |0.898 - 0.825| + |0.948 - 0.962| + (0.948 - 0.855) + (0.962 - 0.735) + (1 - 1) + (0.75 - 0.75)}, 0 \right), 0 \right\} = \\ = 0.202 \end{aligned}$$

Понављањем приказаног поступка, одређују се горња матрица преферентности, P^U и доња матрица преферентности, P^L су:

$$P^U = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.238 & 0.050 & 0.094 \\ 0.762 & 0.500 & 0.039 & 0.082 \\ 0.950 & 0.960 & 0.500 & 0.884 \\ 0.906 & 0.918 & 0.116 & 0.500 \end{bmatrix} \quad P^L = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.202 & 0.014 & 0.021 \\ 0.798 & 0.500 & 0 & 0.036 \\ 0.986 & 1 & 0.500 & 0.943 \\ 0.979 & 0.964 & 0.057 & 0.500 \end{bmatrix}$$

Вредност ранга се одређује на следећи начин:

$$\text{Rank} \left(\frac{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_{11}^U}{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_1^-} \right) = 0.157 \text{ и } \text{Rank} \left(\frac{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_{11}^L}{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_1^-} \right) = 0.145$$

$$\text{Rank} \left(\frac{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_{11}}{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_1^-} \right) = \frac{1}{2} \cdot (0.157 + 0.145) = 0.151$$

Остале вредности одређују се на идентичан начин:

$$\text{Rank} \left(\frac{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_{12}}{\tilde{z}_2^+ - \tilde{z}_2^-} \right) = 0.196, \text{ Rank} \left(\frac{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_{13}}{\tilde{z}_3^+ - \tilde{z}_3^-} \right) = 0.363 \text{ and } \text{Rank} \left(\frac{\tilde{z}_1^+ - \tilde{z}_{14}}{\tilde{z}_4^+ - \tilde{z}_4^-} \right) = 0.289.$$

Вредност индивидуалног одступања, за начин отказа $i = 1$, дефинисана је на основу добијеног резултата:

$$\tilde{R}_1 = ((0.94, 0.96, 0.99; 1), (0.95, 0.96, 0.98; 0.75))$$

Вредност групне корисности и вредност индивидуалног одступања за све остале начине отказа одређене су на исти начин.

Применом процедуре за поређење *IT2FNs* (*Chen* и *Lee*, 2010), израчунате су следеће вредности:

$$\tilde{S}^* = ((3.16, 3.39, 3.82; 1), (3.22, 3.39, 3.73; 0.75))$$

$$\tilde{S}^{max} = ((3.62, 3.80, 3.94; 1), (3.67, 3.80, 3.89; 0.75))$$

$$\tilde{R}^* = ((0.94, 0.96, 0.97; 1), (0.95, 0.96, 0.98; 0.75))$$

$$\tilde{R}^{max} = ((0.98, 0.99, 0.99; 1), (0.99, 0.99, 0.99; 0.75))$$

Дистанца $d(\tilde{S}_1, \tilde{S}^*)$ је одређена на следећи начин:

$$d(\tilde{S}_1, \tilde{S}^*) = \frac{1}{12} \cdot \left\{ |3.16 - 3.42| + 4 \cdot |3.39 - 3.64| + |3.82 - 3.90| + \frac{|3.22 - 3.48| + 4 \cdot |3.39 - 3.64| + |3.74 - 3.85|}{0.75^2} \right\} = 0.622$$

Генерални *VIKOR* индекс за начин отказа $i = 1$, при вредности $\alpha = 0.5$, одређује се на следећи начин:

$$Q_1 = 0.5 \cdot \frac{0.634}{0.290} + (1 - 0.5) \cdot \frac{0.036}{0.019} = 0.335$$

Применом овог поступка, генерални *VIKOR* индекс је израчунат и за остале начине отказа. Као што се може видети у табели 5.10, вредност генералног *VIKOR* индекса је приказана за различите вредности параметра α .

Табела 5.10 – Компромисна ранг листа (*Aleksić* и др., 2023)

i	$\alpha = 0$	Ранг	$\alpha = 1$	Ранг	$\alpha = 0.5$	Ранг
$i = 1$	0.036	2	0.634	18	0.335	7
$i = 2$	0.412	5-14	0.088	3	0.250	5
$i = 3$	0.412	5-14	0	1-2	0.206	2-3
$i = 4$	0.999	17-21	0.097	4	0.548	14
$i = 5$	0.999	17-21	0.243	8	0.621	17
$i = 6$	0.999	17-21	0.189	6	0.594	16
$i = 7$	0.093	3	0.402	9	0.247	4
$i = 8$	0.412	5-13	0.427	13-14	0.419	9-10
$i = 9$	0.412	5-13	0.427	13-14	0.419	9-10
$i = 10$	0.999	17-21	0.735	20	0.867	20
$i = 11$	0.999	17-21	0.156	5	0.577	15
$i = 12$	0.412	5-14	0	1-2	0.206	2-3
$i = 13$	0.412	5-14	0.241	6	0.326	6
$i = 14$	0.999	17-21	0.578	15	0.788	19
$i = 15$	0	1	0.408	10	0.204	1
$i = 16$	0.659	15-16	0.409	11	0.534	13
$i = 17$	0.999	16-21	1	21	0.999	21
$i = 18$	0.659	15-16	0.668	19	0.663	18
$i = 19$	0.303	4	0.423	12	0.363	8
$i = 20$	0.412	5-14	0.614	16-17	0.513	11-12
$i = 21$	0.412	5-14	0.614	16-17	0.513	11-12

Приоритет начина отказа, који је одређен на основу предложеног *FMEA* оквира, треба да буде полазна тачка за побољшање поузданости и ефикасности производног процеса. Начин отказа $i = 15$ је на првом месту у рангу на компромисној ранг листи. Стога, потребно је извршити проверу испуњености првог услова (*C1*):

$$0.206 - 0.204 \geq 1/20$$

Из приказаног израза се може закључити на услов *C1* није испуњен. Како начин отказа $i = 15$ није први у рангу када је $\alpha = 1$ и $\alpha = 0$, то значи да ни услов *C2* није задовољен.

У случају када ни услов *C1*, а ни услов *C2* није испуњен, компромисно решење се одређује на следећи начин:

$$Q_3 - Q_{15} = 0.206 - 0.204 = 0,02 < 0.05$$

$$Q_7 - Q_{15} = 0.247 - 0.204 = 0,043 < 0.05$$

$$Q_2 - Q_{15} = 0.250 - 0.204 = 0,046 < 0.05$$

$$Q_{12} - Q_{15} = 0.326 - 0.204 = 0,120 < 0.05$$

У овом случају, компромисно решење се представља скупом начина отказа: $i = 15, i = 3, i = 12, i = 7$ и $i = 2$.

У оквиру овог истраживања, предложена је методологија са одређивање скупа начина отказа који имају највећи утицај, а самим тим и највећу важност за процес производње у разматраном предузећу. У поређењу са конвенционалним *FMEA* приступом, предложени модел има одређене предности. Пре свега, начини отказа се анализирају на основу већег броја критеријума. У конвенционалној методи озбиљност последице се разматра само са аспекта квалитета и делимично са безбедносног аспекта. С друге стране, предложени модел уводи нови, односно трошковни аспект (*Aleksić* и др., 2023).

Један од најважнијих задатака оперативног менаџмента јесте решавање проблема застоја и трошкова који настају као њихова последица. Посматрано из ове перспективе, предложени модел има фокус управо на трошковима који настају услед застоја у производном процесу, а који су укључени у трошковни аспект фактора ризика *S*. У поређењу са неким хибридни *FMEA* приступима, попут (*Liu, 2016; Aleksić* и др., 2019; *Boral* и *Chakraborty, 2021*), предложени модел има одређене предности. Пре свега, постојећи хибридни модели дају ранг начина отказа, али не сугеришу оперативном менаџменту којим редоследом идентификоване начине отказа треба третирати. У пракси је познато да приоритет отказа, односно ранг, често није једини параметар при одређивању редоследа предузимања активности. Применом предложеног модела, оперативни менаџмент се фокусира преваходно на дефинисан скуп начина отказа: $i = 15, i = 3, i = 12, i = 7$ и $i = 2$. На овај начин се, осим приоритета/ранга начина отказа, даје и упутство којим редоследом начине отказа треба третирати (*Aleksić* и др., 2023).

Поред наведеног, основни теоријски доприноси предложеног модела су (*Aleksić* и др., 2023):

- Моделовање постојећих неизвесности заснива се на *IT2FNs*.
- Одређивање релативне важности фактора ризика постављено је као проблем фази групног одлучивања.
- Вектори тежина фактора ризика одређени су применом *IT2FBWM*, што има одређене предности у односу на примену директне процене ових вредности или у односу на примену *AHP* оквира.
- Начини отказа су рангирани применом предложеног *IT2VIKOR* приступа. На овај начин се искључује коришћење *RPN* параметра за рангирање начина отказа, на чије недостатке и непоузданост су указали многобројни аутори.

У практичном смислу, предложени модел пружа оперативном менаџменту скуп начина отказа које сигурно треба третирати, односно предузети мере да се редукује или елиминира њихов утицај. Методологија има фокус на начинима отказа које треба третирати у што краћем року, узимајући у обзир и трошкове који могу да настану услед застоја у производном процесу. Осим предочених предности, модел има и одређена ограничења. Пре свега, од процена доносилаца одлука, које су увек у одређеној мери субјективне, зависе и крајњи резултати. Друго ограничење модела јесте његова комплексност. Примена модела захтева велики обим рачунања и употребу више оптимизационих метода (*Aleksić* и др., 2023).

5.3 ОЦЕНА И ИЗБОР ДОБАВЉАЧА У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ

Истраживање је спроведено из перспективе предузећа које је оригинални произвођач опреме у ланцу снабдевања. Седиште овог предузећа се налази у централној Србији. Предузеће је присутно и на европском тржишту и представља значајан субјекат у ланцу снабдевања. Подаци коришћени у овом истраживању су прикупљени током 2019. године. У појединим случајевима, подаци су прикупљени емпиријски или у складу са добром праксом, док су у појединим случајевима вредности процењиване у складу са тренутним вредностима разматраних променљивих. Прикупљање података ове врсте је веома комплексно и захтевало је нешто дужи временски период. Другим речима, подаци се нису могли прикупити у оквиру само једне сесије или само једног интервјуа (*Komatina* и др., 2022b).

Делови (производи) који се купују од потенцијалних добављача су веома важни за процес производње разматраног предузећа, тако да је поступак избора добављача веома значајан, како за предузеће, тако и за читав ланац снабдевања. Увидевши значај проблема, практичари су организовали семинар на коме су учествовали и истраживачи, а основни циљ семинара био је унапређење процеса набавке. Један од начина за унапређење процеса набавке је свакако и унапређење поступка избора добављача. Превасходни задатак је био да се одреди скуп критеријума на основу којих би се оцењивали потенцијални добављачи. Након детаљне анализе критеријума који се користе у пракси, али и критеријума који се могу пронаћи у релевантној литератури, одлучено је да се за потребе овог истраживања користе критеријуми за избор добављача (*SSCs*) дефинисани у раду (*Mohammed, Harris и Govindan, 2019*).

Како би се извршило оцењивање потенцијалних добављача, састављена су два упитника. Први упитник се односио на процену релативне важности критеријума и поткритеријума, док се други упитник односио на оцену добављача према дефинисаним критеријумима и поткритеријумима. Током две недеље, колико је семинар трајао, организоване су три панел дискусије. председавајући на свакој од ових дискусија био је један од доносилаца одлука, односно менаџер набавке, *EMS* менаџер и менаџер безбедности и здравља на раду. На крају сваке панел дискусије, истраживачи су методом интервјуа прикупљали податке од менаџера, и то на основу два претходно формирана упитника (*Komatina* и др., 2022b).

Предложени модел је дат у потпоглављу 4.3. Студија случаја и резултати истраживања објављени су кроз рад (*Komatina* и др., 2022b) и надаље су приказани:

Предложени поступак (од *Корак 1* до *Корак 4* предложеног алгорита) је илустрован на примеру утврђивања релативне важности *SSCs* према проценама менаџера набавке:

$$\begin{bmatrix} 1 & VH & M \\ & 1 & 1/L \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

Како би се извршила провера конзистентности процена претходно је извршена дефазификација вредности према процедури дефинисаној у (*Kahraman* и др., 2014):

$$\begin{bmatrix} 1 & 6.04 & 4.38 \\ & 1 & 0.33 \\ & & 1 \end{bmatrix}, \text{C. I.} = 0.09$$

Вектори тежина *SSCs* су израчунати коришћењем *FAHP* методе (*Kahraman* и др., 2014), према проценама менаџера набавке:

$$\tilde{\omega}_1^1 = ((0.30, 0.75, 1.55; 1), (0.36, 0.75, 1.35; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_2^1 = ((0.04, 0.07, 0.28; 1), (0.05, 0.07, 0.20; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_3^1 = ((0.08, 0.19, 0.51; 1), (0.10, 0.19, 0.41; 0.75))$$

На исти начин је извршена процена од стране *EMS* менаџера. Применом истог поступка дефазификације и провере конзистентности израчунат је индекс конзистентности:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/VL & VL \\ & 1 & M \\ & & 1 \end{bmatrix}, \text{C. I.} = 0.04$$

Вектори тежина *SSCs* израчунати на основу процена *EMS* менаџера су:

$$\tilde{\omega}_1^2 = ((0.08, 0.30, 0.92; 1), (0.08, 0.30, 0.86; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_2^2 = ((0.21, 0.52, 1.79; 1), (0.23, 0.52, 1.64; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_3^2 = ((0.04, 0.18, 0.35; 1), (0.04, 0.18, 0.31; 0.75))$$

Процене од стране менаџера безбедности и здравља на раду су надаље приказане, као и израчунат индекс конзистентности:

$$\begin{bmatrix} 1 & M & 1/VL \\ & 1 & 1/H \\ & & 1 \end{bmatrix}, \text{C. I.} = 0.00$$

Вектори тежина *SSCs* израчунати на основу процена менаџера безбедности и здравља на раду су:

$$\tilde{\omega}_1^3 = ((0.11, 0.44, 0.78; 1), (0.12, 0.44, 0.72; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_2^3 = ((0.04, 0.08, 0.18; 1), (0.04, 0.08, 0.16; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_3^3 = ((0.24, 0.48, 1.62; 1), (0.26, 0.48, 1.47; 0.75))$$

Агрегација тежина *SSCs* извршена је применом фази геометријске средине:

$$\tilde{\omega}_1 = ((0.14, 0.46, 1.04; 1), (0.15, 0.46, 0.94; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_2 = ((0.07, 0.14, 0.45; 1), (0.08, 0.14, 0.37; 0.75))$$

$$\tilde{\omega}_3 = ((0.09, 0.25, 0.66; 1), (0.10, 0.25, 0.57; 0.75))$$

Надаље су представљене фази матрице парова упоређења поткритеријума унутар сваког разматраног *SSCs*, као и њихови вектори тежина (*Корак 5* предложеног алгоритма).

Релативна важност поткритеријума унутар *SSC*, $k = 1$:

$$\begin{bmatrix} 1 & M & H & L \\ & 1 & L & 1/VL \\ & & 1 & 1/L \\ & & & 1 \end{bmatrix}, \text{C. I.} = 0.08$$

Вектори тежина поткритеријума унутар *SSC*, $k = 1$ су:

$$\tilde{\theta}_1^1 = ((0.19, 0.51, 1.57; 1), (0.23, 0.51, 1.37; 0.75)) \quad \tilde{\theta}_2^1 = ((0.04, 0.19, 0.41; 1), (0.05, 0.19, 0.35; 0.75))$$

$$\tilde{\theta}_3^1 = ((0.03, 0.07, 0.2; 1), (0.03, 0.07, 0.17; 0.75)) \quad \tilde{\theta}_4^1 = ((0.07, 0.22, 0.86; 1), (0.08, 0.22, 0.68; 0.75))$$

Релативна важност поткритеријума унутар *SSC*, $k = 2$:

$$\begin{bmatrix} 1 & L & H \\ & 1 & L \\ & & 1 \end{bmatrix}, \text{C. I.} = 0.04$$

Вектори тежина поткритеријума унутар *SSC*, $k = 2$ су:

$$\tilde{\theta}_1^2 = ((0.25, 0.74, 1.57; 1), (0.33, 0.74, 1.32; 0.75)) \quad \tilde{\theta}_2^2 = ((0.09, 0.17, 0.81; 1), (0.09, 0.17, 0.61; 0.75))$$

$$\tilde{\theta}_3^2 = ((0.04, 0.09, 0.26; 1), (0.05, 0.09, 0.19; 0.75))$$

Релативна важност поткритеријума унутар *SSC*, $k = 3$:

$$\begin{bmatrix} 1 & L & L \\ & 1 & VL \\ & & 1 \end{bmatrix}, \text{C. I.} = 0.00$$

Вектори тежина поткритеријума унутар SSC , $k = 3$ су:

$$\tilde{\Theta}_1^3 = ((0.16, 0.64, 1.80; 1), (0.23, 0.64, 1.44; 0.75)) \quad \tilde{\Theta}_2^3 = ((0.09, 0.18, 1.07; 1), (0.10, 0.18, 0.35; 0.77))$$

$$\tilde{\Theta}_3^3 = ((0.04, 0.18, 0.55; 1), (0.05, 0.18, 0.41; 0.75))$$

Фази оцене добављача према разматраним поткритеријума представљене су у табели 5.11 и представљају матрицу одлучивања (*Корак 6* предложеног алгоритма).

Табела 5.11 – Фази оцене добављача према поткритеријума унутар сваког разматраног SSC (Komatina и др., 2022b)

Критеријум	Поткритеријум	Добављач 1 ($i = 1$)	Добављач 2 ($i = 2$)	Добављач 3 ($i = 3$)	Добављач 4 ($i = 4$)	Добављач 5 ($i = 5$)	Добављач 6 ($i = 6$)
Конвенционални критеријуми ($k = 1$)	Трошкови ($j = 1$)	$L6$	$L6$	$L7$	$L7$	$L6$	$L6$
	Квалитет производа ($j = 2$)	$L6$	$L7$	$L6$	$L6$	$L4$	$L5$
	Технолошки капацитет ($j = 3$)	$L7$	$L5$	$L5$	$L6$	$L3$	$L6$
	Поузданост испоруке ($j = 4$)	$L5$	$L7$	$L6$	$L6$	$L5$	$L5$
Критеријуми животне средине ($k = 2$)	EMS систем ($j = 1$)	$L6$	$L4$	$L4$	$L7$	$L3$	$L3$
	Управљање отпадом ($j = 2$)	$L5$	$L1$	$L4$	$L6$	$L2$	$L4$
	Загађење отпадом ($j = 3$)	$L4$	$L2$	$L3$	$L6$	$L1$	$L5$
Критеријуми безбедности и здравља на раду ($k = 3$)	Безбедност и здравље запослених ($j = 1$)	$L7$	$L4$	$L2$	$L5$	$L4$	$L5$
	Развој кадрова ($j = 2$)	$L6$	$L6$	$L5$	$L7$	$L3$	$L4$
	Доступност информација ($j = 3$)	$L6$	$L4$	$L6$	$L7$	$L5$	$L3$

Нормализоване агрегиране фази вредности за сваки $SSCs$ (*Корак 7* и *Корак 8* предложеног алгоритма) израчунате су и приказане у табели 5.12.

Табела 5.12 – Нормализована агрегирана фази матрица одлучивања (Komatina и др., 2022b)

i	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
$i = 1$	$\left(\begin{array}{l} (0.11, 0.45, 1.64; 1), \\ (0.14, 0.45, 1.27; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.22, 0.75, 2.37; 1), \\ (0.30, 0.75, 1.79; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.22, 0.94, 3.42; 1), \\ (0.31, 0.94, 2.15; 0.75) \end{array} \right)$
$i = 2$	$\left(\begin{array}{l} (0.13, 0.53, 1.71; 1), \\ (0.16, 0.53, 1.38; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.12, 0.47, 1.71; 1), \\ (0.17, 0.47, 1.39; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.14, 0.61, 2.76; 1), \\ (0.19, 0.61, 1.77; 0.75) \end{array} \right)$
$i = 3$	$\left(\begin{array}{l} (0.11, 0.45, 1.65; 1), \\ (0.14, 0.45, 1.27; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.14, 0.54, 1.84; 1), \\ (0.19, 0.54, 1.58; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.09, 0.46, 2.29; 1), \\ (0.14, 0.46, 1.24; 0.75) \end{array} \right)$
$i = 4$	$\left(\begin{array}{l} (0.11, 0.45, 1.67; 1), \\ (0.14, 0.45, 1.29; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.27, 0.89, 2.42; 1), \\ (0.36, 0.89, 1.92; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.20, 0.82, 3.67; 1), \\ (0.27, 0.82, 1.96; 0.75) \end{array} \right)$
$i = 5$	$\left(\begin{array}{l} (0.08, 0.36, 1.44; 1), \\ (0.11, 0.36, 1.29; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.08, 0.43, 1.50; 1), \\ (0.12, 0.43, 1.09; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.10, 0.56, 2.38; 1), \\ (0.16, 0.56, 1.64; 0.75) \end{array} \right)$
$i = 6$	$\left(\begin{array}{l} (0.10, 0.42, 1.60; 1), \\ (0.13, 0.42, 1.22; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.09, 0.40, 1.51; 1), \\ (0.13, 0.40, 1.17; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.13, 0.63, 2.68; 1), \\ (0.20, 0.63, 1.67; 0.75) \end{array} \right)$

Отежане нормализоване агрегиране фази вредности за сваки *SSCs* (Корак 9 предложеног алгоритма) израчунате су и приказане у табели 5.13.

Табела 5.13 – Отежана нормализована агрегирана фази матрица одлучивања (Komatina и др., 2022b)

<i>i</i>	<i>k</i> = 1	<i>k</i> = 2	<i>k</i> = 3
<i>i</i> = 1	$\left(\begin{array}{l} (0.16, 0.67, 2.74; 1), \\ (0.17, 0.67, 2.13; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.09, 0.24, 1.67; 1), \\ (0.10, 0.24, 1.03; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.11, 0.49, 2.92; 1), \\ (0.13, 0.49, 1.80; 0.75) \end{array} \right)$
<i>i</i> = 2	$\left(\begin{array}{l} (0.16, 0.70, 2.82; 1), \\ (0.17, 0.70, 2.25; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.08, 0.21, 1.22; 1), \\ (0.09, 0.21, 0.88; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.10, 0.40, 2.48; 1), \\ (0.12, 0.40, 1.57; 0.75) \end{array} \right)$
<i>i</i> = 3	$\left(\begin{array}{l} (0.16, 0.67, 2.76; 1), \\ (0.17, 0.67, 2.13; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.08, 0.22, 1.28; 1), \\ (0.09, 0.22, 0.95; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.09, 0.36, 2.17; 1), \\ (0.11, 0.36, 1.28; 0.75) \end{array} \right)$
<i>i</i> = 4	$\left(\begin{array}{l} (0.16, 0.67, 2.78; 1), \\ (0.17, 0.67, 2.15; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.09, 0.26, 1.54; 1), \\ (0.11, 0.26, 1.08; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.11, 0.45, 3.08; 1), \\ (0.13, 0.45, 1.69; 0.75) \end{array} \right)$
<i>i</i> = 5	$\left(\begin{array}{l} (0.15, 0.63, 2.54; 1), \\ (0.17, 0.63, 2.15; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.08, 0.20, 1.12; 1), \\ (0.09, 0.20, 0.98; 0.77) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.10, 0.39, 2.23; 1), \\ (0.12, 0.39, 1.50; 0.75) \end{array} \right)$
<i>i</i> = 6	$\left(\begin{array}{l} (0.15, 0.65, 2.70; 1), \\ (0.17, 0.65, 2.09; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.08, 0.09, 1.13; 1), \\ (0.09, 0.09, 0.80; 0.75) \end{array} \right)$	$\left(\begin{array}{l} (0.10, 0.41, 2.43; 1), \\ (0.12, 0.41, 1.52; 0.75) \end{array} \right)$

Према предложеном алгоритму (Корак 10) формирана је ВАА матрица:

$$\left[\left(\begin{array}{l} (0.16, 0.66, 2.72; 1), \\ (0.17, 0.66, 2.15; 0.75) \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} (0.08, 0.18, 1.31; 1), \\ (0.09, 0.18, 0.95; 0.75) \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} (0.10, 0.41, 2.53; 1), \\ (0.12, 0.41, 1.55; 0.75) \end{array} \right) \right]^{-1}$$

Припадност добављача ВААs је одређена и илустрована следећим примером (Корак 11 предложеног алгоритма):

$$\begin{aligned} & p(\tilde{v}_{11}^U \geq \tilde{q}_1^U) \\ &= \max \left\{ 1 - \max \left(\frac{\max(0.16-0.16,0)+2 \cdot \max(0.66-0.67,0)+\max(2.72-2.74,0)+(2.72-0.16)+\max(1-1,0)}{|0.16-0.16|+2 \cdot |0.66-0.67|+|2.72-2.74|+(2.72-0.16)+(2.74-0.16)+(1-1)}, 0 \right), 0 \right\} \\ & p(\tilde{v}_{11}^U \geq \tilde{q}_1^U) \\ &= \max \left\{ 1 - \max \left(\frac{\max(0,0) + 2 \cdot \max(-0.01,0) + \max(-0.02,0) + 2.56 + \max(0,0)}{0 + 0.02 + 0.02 + 0.18 + 2.56 + 2.58}, 0 \right), 0 \right\} \end{aligned}$$

$$p(\tilde{v}_{11}^U \geq \tilde{q}_1^U) = \max\{1 - \max(0.478,0), 0\} = \max\{1 - 0.478,0\} = 0.522$$

$$p(\tilde{v}_{11}^L \geq \tilde{q}_1^L) =$$

$$\max \left\{ 1 - \max \left(\frac{\max(0.17-0.17,0)+2 \cdot \max(0.66-0.67,0)+\max(2.15-2.13,0)+(2.15-0.17)+\max(0.75-0.75,0)}{|0.17-0.17|+2 \cdot |0.66-0.67|+|2.15-2.13|+(2.15-0.17)+(2.13-0.17)+(0.75-0.75)}, 0 \right), 0 \right\}$$

$$p(\tilde{v}_{11}^L \geq \tilde{q}_1^L) = \max\{1 - \max(0.503,0), 0\} = 0.497$$

Горња фази матрица преферентности:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.522 \\ 0.478 & 0.5 \end{bmatrix}$$

Доља фази матрица преферентности:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.497 \\ 0.503 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rank}(\tilde{A}_{11}^U) = \frac{1}{2} \cdot (0.5 + 0.522) = 0.511$$

$$\text{Rank}(\tilde{A}_{11}^L) = \frac{1}{2} \cdot (0.5 + 0.497) = 0.498$$

$$\text{Rank}(\tilde{A}_{11}) = \frac{0.511 + 0.498}{2} = 0.505$$

На основу добијених резултата се може закључити да добављач $i = 1$ унутар $SSCs$ ($k = 1$) припада BAA , G^+ . Припадност осталих добављача BAA s према сваком разматраном критеријуму одређена је на исти начин и представљена је у табели 5.14.

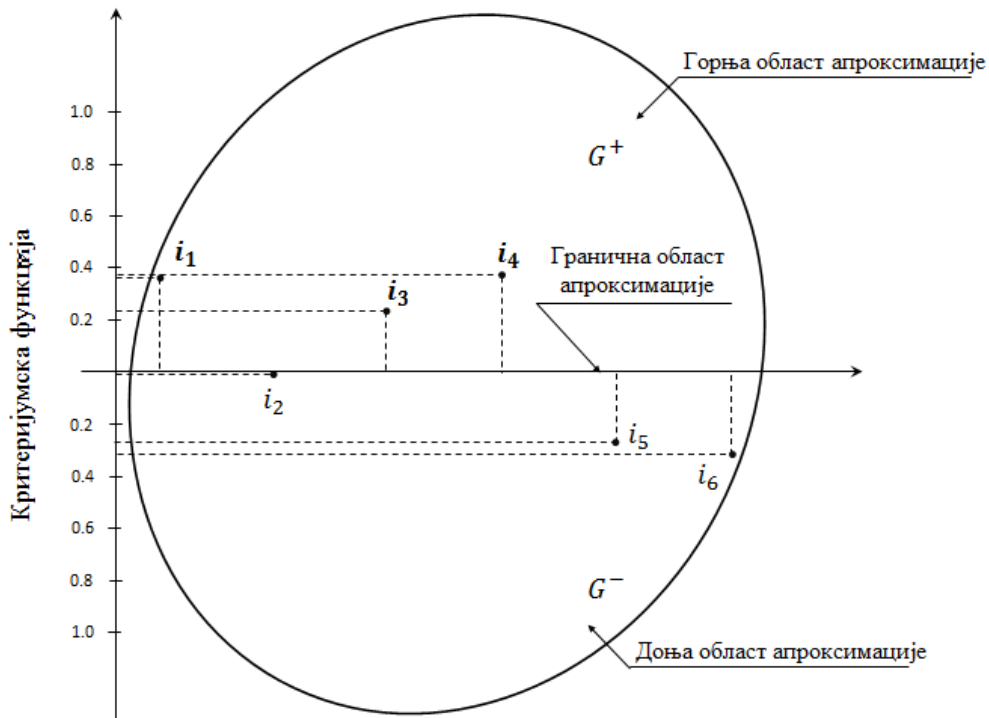
Табела 5.14 – Припадност добављача BAA s (Komatina и др., 2022b)

i	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
$i = 1$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{11}) = 0.505 \rightarrow G^+$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{12}) = 0.551 \rightarrow G^+$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{13}) = 0.545 \rightarrow G^+$
$i = 2$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{21}) = 0.515 \rightarrow G^+$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{22}) = 0.448 \rightarrow G^-$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{23}) = 0.500 \rightarrow G$
$i = 3$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{31}) = 0.500 \rightarrow G$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{32}) = 0.507 \rightarrow G^+$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{33}) = 0.451 \rightarrow G^-$
$i = 4$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{41}) = 0.504 \rightarrow G^+$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{42}) = 0.534 \rightarrow G^+$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{43}) = 0.539 \rightarrow G^+$
$i = 5$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{51}) = 0.487 \rightarrow G^-$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{52}) = 0.489 \rightarrow G^-$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{53}) = 0.478 \rightarrow G^-$
$i = 6$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{61}) = 0.494 \rightarrow G^-$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{62}) = 0.469 \rightarrow G^-$	$\text{Rank}(\tilde{A}_{63}) = 0.500 \rightarrow G$

Дистанца добављача од BAA s и вредност критеријумске функције добављача, S_i , израчунате су и представљене у табели 5.15 (Корак 12 и Корак 13 предложеног алгоритма). На слици 5.2 графички је приказана припадност добављача областима апроксимације.

Табела 5.15 – Дистанца добављача од BAA s и вредност критеријумске функције добављача (Komatina и др., 2022b)

i	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	S_i
$i = 1$	0.013	0.155	0.195	0.363
$i = 2$	0.062	-0.050	-0.023	-0.011
$i = 3$	0.019	0.026	0.186	0.231
$i = 4$	0.025	0.118	0.233	0.376
$i = 5$	-0.076	-0.079	-0.125	-0.280
$i = 6$	-0.257	-0.109	0.043	-0.323



Слика 5.2 – Припадност добављача областима апроксимације (Komatina и др., 2022b)

На основу резултата добијених применом предложене методологије, која се заснива на *IT2FMABAC* методи, менаџмент са већом поузданошћу може да одреди стратегију снабдевања. Применом предложене методологије се добија скуп прихватљивих и неприхватљивих добављача, у чему се *MABAC* метода разликује од многих других *MADM* метода. У конкретно овом случају, добављачи које потенцијално треба размотрити као будуће партнере су $i = 1$; $i = 3$ и $i = 4$. Менаџмент предузећа може одлучити да купује производе од сва три добављача, али се такође може одлучити за само једног или два добављача. Из перспективе менаџмента, предложена методологија даје увид у то који су добављачи прихватљиви, а који нису. У практичном смислу, ова чињеница се може истаћи као главни допринос примене *IT2FMABAC* методе (Komatina и др., 2022b).

Основни циљ истраживања је био да се утврди који добављачи из скупа разматраних имају потенцијал да се интегришу у ланац снабдевања. Предложена методологија се спроводи кроз два корака. Најпре је одређен скуп критеријума, односно *SSCs* и поткритеријума на основу истраживања спроведеног у раду (Mohammed, Harris и Govindan, 2019). Затим је применом *IT2FAHP* методе одређена релативна важност критеријума и поткритеријума. Други корак методологије односи се на примеру предложеног *IT2FMABAC* приступа, на основу ког се врши раздвајање прихватљивих од неприхватљивих решења. Ово се може навести и као главни допринос спроведеног истраживања. Такође, у односу на поједине анализе које се заснивају на статистичкој анализи података из евиденције, предложена методологија има одређене предности у присуству сталне неизвесности. Предложена методологија је заснована на примени *IT2TFNs*, што у условима неизвесности методологију чини прихватљивијом у односу на статистичке методе. Поред тога, неки подаци нису доступни у евиденцији и захтевају другачији начин прикупљања, попут процењивања, упоређивања и сл. (Komatina и др., 2022b).

Основно ограничење предложеног модела односи се на висок ниво субјективности доносилаца одлука, нарочито приликом процењивања важности *SSCs* и поткритеријума. Правце будућих истраживања треба усмерити на: 1) примену предложеног модела у различитим гранама индустрије и 2) моделовање неизвесности и непрецизности применом сферних или неких других фази скупова (*Komatina* и др., 2022b).

5.4 АНАЛИЗА ФАКТОРА КОЈИ УТИЧУ НА БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ ЗАПОСЛЕНИХ НА РАДНОМ МЕСТУ У АУТОМОБИЛСКОЈ ИНДУСТРИЈИ

У оквиру овог потпоглавља је представљена студија случаја која је спроведена на основу модела приказаног у потпоглављу 4.4. Истраживање је спроведено у предузећу које је добављач првог реда у ланцу снабдевања. Резултати истраживања су публиковани кроз рад (*Komatina* и др., 2021).

У предузећу које производи делове од гуме, који се превасходно уграђују у аутомобиле и друга моторна возила, извршена је анализа утицаја *HOTRFs* на безбедност и здравље радника на следећим радним местима:

- 1) оператер на машини за кримповање,
- 2) оператер на машини за сечење и спајање,
- 3) оператер на флокинг машини,
- 4) оператер на машини за екструдирање и
- 5) оператер на преси.

Сви *HOTRFs* су подељени у три групе фактора, а то су (*ICAO*, 2013): 1) људски, 2) организациони и 3) технички/технолошки. У табели 5.16 приказани су сви *HOTRFs* који припадају наведеним групама.

Табела 5.16 – Људски, организациони и технички/технолошки фактори (*HOTRFs*) (*ICAO*, 2013; *Komatina* и др., 2021)

	Ред. бр. <i>HOTRF</i>	<i>HOTRF</i>	Индикатори <i>HOTRFs</i>
Људски фактори	$j = 1$	Персоналне карактеристике	Процентуална вредност заснована на процени сектора људских ресурса на основу анкета и профила запослених. Тренутна вредност се одређује према идеалном стању (100%) до ког би се евентуално могло доћи у разматраном предузећу.
	$j = 2$	Искуство	Број година проведених на радном месту захтеваних карактеристика, узимајући у обзир идеално стање (у производном сектору то је период од 5 година), у односу на оно што је запослени могао научити и постићи.
	$j = 3$	Ниво обуке	Број завршених обука у предузећу у односу на број планираних обука за одређену радну активност (нпр. завршено 4 од 10 предвиђених обука).
	$j = 4$	Понашање	Процена односа запосленог према радним обавезама и одговорности према радним задацима. Идеално стање дефинише предузеће (нпр. проценат пробијених рокова од стране радника или кашњења на посао).
	$j = 5$	Односи	Процентуална вредност заснована на процени сектора људских ресурса на основу тога колико су добри или лоши односи међу запосленима (атмосфера у предузећу). Тренутна вредност се одређује у односу на идеално стање које би евентуално могло да се достигне у разматраном предузећу. У овом случају се може пратити број конфликта у одређеним временском периоду и сл.

Табела 5.16 (наставак) – Људски, организациони и технички/технолошко фактори (*HOTRFs*) (ICAO, 2013; Komatina и др., 2021)

	Ред. бр. <i>HOTRF</i>	<i>HOTRF</i>	Индикатори <i>HOTRFs</i>
Организациони фактори	$j = 6$	Темпо рада	Вредност која се односи на стопу заузетости радног места у односу на расположиви број радних сати (нпр. радно место је 100% заузето током три радне смене, шест дана у недељи).
	$j = 7$	Организација и распоред радних задатака	Број успешно извршених радних задатака у односу на планиран број (нпр. један завршен и један започет од пет планираних).
	$j = 8$	Информације, процедуре и документација	Број имплементираних стандарда, процедура и пратеће документације у односу на оно што је неопходно у разматраном предузећу (сектору).
	$j = 9$	Ергономија радног места	Оцена интеракције запослени-радно место (процент имплементираних ергономских стандарда).
	$j = 10$	Систем безбедности и здравља на раду (енгл. <i>Occupational Safety and Health</i> , скр. <i>OSH</i>)	Стање безбедности и здравља на раду у разматраном предузећу у односу на идеално стање (број повреда, небезбедних услова и небезбедних поступака, број спроведених <i>OSH</i> акција на годишњем нивоу).
Технички/технолошки фактори	$j = 11$	Техничке карактеристике опреме	Тренутне карактеристике опреме у односу на потребне карактеристике опреме за једноставно и квалитетно обављање радних задатака (нпр. коришћење колица за транспорт делова насупротив ручном транспорту).
	$j = 12$	Ниво аутоматизације	Ниво тренутне аутоматизације у односу на ниво могуће аутоматизације.
	$j = 13$	Безбедносне карактеристике опреме и уређаја	Ниво применљивости постојеће сигурносне опреме и уређаја (нпр. проценат уклоњених сигурносних уређаја са машина или најсавременији ниво уређаја у односу на постојеће на тржишту).
	$j = 14$	Ниво одржавања опреме	Типови активности одржавања које се спроводе у погледу детаљних годишњих планова.
	$j = 15$	Карактеристике личне заштитне опреме	Врста личне заштитне опреме која се користи у односу на неопходну.

У наставку потпоглавља је приказана студија случаја дата у раду (Komatina и др., 2021):

Поступак којим се одређује релативна важност *HOTRFs* је спроведен применом модификоване Делфи методе. Доносиоци одлука су путем имејла добијали упитнике, које су на исти начин слали након исказивања својих процена. Поступак одређивања релативне важности *HOTRFs* дефинисан је у предложеном алгоритму, од *Корак 1* до *Корак 4*, и у оквиру ове студије случаја илустрован је примером за *HOTRF*, $j = 1$ (персоналне карактеристике). Процене доносилаца одлука за релативну важност $j = 1$ у првој итерацији биле су: $W9$, $W5$, $W7$, $W3$, $W6$, $W2$, $W4$, $W1$, $W3$ и $W2$.

Након тога је извршена агрегација релативне важности *HOTRFs*, $j = 1$, на основу процена свих доносилаца одлука, применом фази метода осредњавања:

$$\tilde{W}_1 = ((0.28, 0.42, 0.57; 1), (0.32, 0.42, 0.52; 0.85))$$

Анализа добијеног решења извршена је применом технике анализе варијансе. Одређивање вредности варијансе агрегираних вредности релативне важности *HOTRFs*, $j = 1$, спроведено је на следећи начин:

$$S_1^2 = \frac{1}{9} \cdot \sum_{e=1, \dots, 10} (\tilde{W}_1 - \tilde{W}_1^e)^2$$

$$S_1^2 = \frac{1}{9} \cdot \sum_{e=1, \dots, 10} (1.156^2 + \dots + 0.539^2) = 0.376$$

У овом истраживању је уведена претпоставка да је максимална дозвољена вредност варијансе одређена условом да 50% доносилаца одлуке сматра да релативну важност треба описати лингвистичким исказом W_8 , док друга половина сматра да релативну важност разматраног $HOTRF$ треба описати лингвистичким исказом W_2 . Стога, у оквиру ове претпоставке, максимална дозвољена вредност варијансе износи 0,6. Другачије речено, уколико је вредност варијансе мања од 0,6, може се сматрати да су доносиоци одлука постигли консензус. Важи и обрнуто.

Следећи корак је тестирање хипотезе на нивоу ризика од 5% да су доносиоци одлука постигли консензус у првој итерацији. Хипотеза X_0 : доносиоци одлука не постижу консензус се математички може представити условом $\sigma_1^2 \geq 0,6$. Алтернатива хипотеза X_1 : доносиоци одлука постижу консензус се математички може представити условом $\sigma_1^2 < 0,6$. У овом случају, статистика одлучивања је:

$$\chi_1^2 = \frac{9 \cdot 0.376}{0.6} = 5.64$$

Таблична вредност χ^2 расподеле за ризик од 5% је:

$$\chi_{0.95,9}^2 = 3.33$$

Како је израчуната вредност већа од табеларне, може се сматрати да се усваја хипотеза X_0 , тј. да консензус у првој итерацији није постигнут.

С обзиром на то да консензус није постигнут у првој итерацији, доносиоцима одлука се шаљу упитници како би поново исказали своје процене. Овога пута, доносиоци одлука добијају референтну вредност на основу које треба да искажу своје процене. Ова вредност се одређује као минимална Еуклидова дистанца између израчунате агрегиране релативне важности за $j = 1$ и унапред дефинисаних лингвистичких исказа:

$$\min_{1, \dots, 9} \left(\left(d(\tilde{W}_1, W_1), \dots, d(\tilde{W}_1, W_9) \right) \right) =$$

$$= \min_{1, \dots, 9} (0.764, 0.539, 0.294, 0.049, 0.196, 0.444, 0.686, 0.391, 1.156) = 0.049$$

На основу добијене вредности, доносиоцима одлука се доставља писана информација да је агрегирана вредност њихових процена у првој итерацији најприближније описана лингвистичким исказом W_4 . На основу тога, доносиоци одлука треба да коригују своје процене.

У другој итерацији, доносиоци одлука су своје процене дали на следећи начин: $W_7, W_4, W_5, W_4, W_5, W_3, W_4, W_3, W_4$ и W_3 . Агрегација релативне важности $HOTRFs$, $j = 1$, на основу изнетих процена свих доносилаца одлука, извршена је на исти начин као у првој итерацији:

$$\tilde{W}_1 = ((0.29, 0.44, 0.59; 1), (0.34, 0.44, 0.54; 0.85))$$

Поново се тестира хипотеза да доносиоци одлука постижу консензус применом технике анализе варијансе. У овом случају, статистика одлучивања је $\chi_1^2 = 1.64$ и мања је од табличне вредности. То значи да је у другој итерацији постигнут консензус и да се усваја добијена вредност \tilde{W}_1 . Поступак одређивања релативне важности осталих *HOTRFs* надаље је табеларно приказан (табела 5.17).

Табела 5.17 – Процене релативне важности *HOTRFs* и њихове агрегиране вредности применом Делфи методе (Komatina и др., 2021)

<i>HOTRFs</i>	Редни број итерације	Процене доносилаца одлука	Варијанса/ Статистика одлучивања/ Просечна процењена вредност	Таблична вредност за ниво ризика од 5%	Постигнут консензус	Релативна важност <i>HOTRFs</i>
$j = 1$	1.	W9, W5, W7, W3, W6, W2, W4, W1, W3, W2	0.376/5.63/W4	3.33	Не	((0.29,0.44,0.59;1), (0.34,0.44,0.54;0.85))
	2.	W7, W5, W6, W4, W5, W3, W4, W3, W4, W3	0.109/1.64		Да	
	3.	/	/		/	
$j = 2$	1.	W6, W6, W9, W7, W8, W9, W8, W5, W9, W9	0.131/1.338	3.33	Да	((0.61,0.76,0.89;1), (0.66,0.76,0.86;0.85))
	2.	/	/		/	
	3.	/	/		/	
$j = 3$	1.	W9, W5, W6, W8, W9, W6, W7, W5, W2, W1	0.426/6.38/ W6	3.33	Не	((0.45,0.6,0.75;1), (0.5,0.6,0.7;0.85))
	2.	W8, W6, W6, W7, W8, W6, W6, W6, W4, W3	0.147/2.20		Да	
	3.	/	/		/	
$j = 4$	1.	W4, W6, W8, W7, W8, W6, W6, W5, W4, W3	0.171/2.61	3.33	Да	((0.42,0.57,0.72;1), (0.47,0.57,0.67;0.85))
	2.	/	/		/	
	3.	/	/		/	
$j = 5$	1.	W6, W4, W2, W2, W3, W2, W2, W2, W1, W1	0.134/2.005	3.33	Да	((0.11,0.23,0.35;1), (0.15,0.23,0.31;0.85))
	2.	/	/		/	
	3.	/	/		/	
$j = 6$	1.	W3, W7, W5, W5, W9, W6, W6, W9, W1, W1	0.474/7.11/ W5	3.33	Не	((0.35,0.5,0.65;1), (0.4,0.5,0.6;0.85))
	2.	W4, W6, W5, W5, W8, W5, W5, W8, W2, W2	0.253/3.80/ W5		Не	
	3.	W5, W5, W5, W5, W7, W5, W5, W7, W3, W3	0.107/1.60		Да	
$j = 7$	1.	W3, W2, W3, W7, W3, W5, W5, W2, W2, W2	0.176/2.64	3.33	Да	((0.19,0.34,0.49;1), (0.24,0.34,0.44;0.85))
	2.	/	/		/	
	3.	/	/		/	
$j = 8$	1.	W1, W1, W3, W5, W9, W5, W3, W1, W1, W1	0.408/6.15/ W3	3.33	Не	((0.16,0.31,0.46;1), (0.21,0.31,0.41;0.85))
	2.	W2, W2, W3, W4, W7, W4, W4, W2, W2, W2	0.158/2.37		Да	
	3.	/	/		/	

Табела 5.17 (наставак) – Процене релативне важности *HOTRFs* и њихове агрегиране вредности применом Делфи методе (Коматина и др., 2021)

<i>HOTRFs</i>	Редни број итерације	Процене доносилаца одлука	Варијанса/ Статистика одлучивања/ Просечна процењена вредност	Таблична вредност за ниво ризика од 5%	Постигнут консензус	Релативна важност <i>HOTRFs</i>
$j = 9$	1.	W2, W4, W3, W5, W5, W9, W6, W9, W3, W1	0.428/6.42/ W5	3.33	Не	((0.34,0.49,0.64;1), (0.39,0.49,0.59;0.85))
	2.	W3, W5, W4, W5, W5, W8, W5, W8, W4, W2	0.219/3.28		Да	
	3.	/	/		/	
$j = 10$	1.	W2, W1, W3, W3, W8, W9, W3, W1, W2, W2	0.459/6.87/ W3	3.33	Не	((0.21,0.36,0.51;1), (0.26,0.36,0.46;0.85))
	2.	W3, W2, W3, W3, W7, W8, W3, W2, W3, W3	0.254/3.80/ W3		Не	
	3.	W3, W3, W3, W3, W6, W6, W3, W3, W3, W3	0.058/0.86		Да	
$j = 11$	1.	W2, W2, W8, W6, W7, W8, W7, W5, W7, W8	0.320/4.80/ W6	3.33	Не	((0.42,0.57,0.72;1), (0.47,0.57,0.67;0.85))
	2.	W3, W3, W7, W6, W6, W7, W6, W6, W6, W7	0.134/2.006		Да	
	3.	/	/		/	
$j = 12$	1.	W2, W2, W7, W6, W6, W5, W4, W7, W6, W6	0.206/3.08	3.33	Да	((0.36,0.51,0.66;1), (0.41,0.51,0.61;0.85))
	2.	/	/		/	
	3.	/	/		/	
$j = 13$	1.	W2, W2, W5, W4, W4, W8, W7, W5, W7, W8	0.357/5.35/ W4	3.33	Не	((0.33,0.48,0.63;1), (0.38,0.48,0.68;0.85))
	2.	W3, W3, W4, W4, W4, W7, W6, W4, W6, W7	0.144/2.16		Да	
	3.	/	/		/	
$j = 14$	1.	W1, W1, W5, W3, W4, W4, W6, W4, W9, W8	0.408/6.07/ W4	3.33	Не	((0.28,0.43,0.58;1), (0.33,0.43,0.53;0.85))
	2.	W2, W2, W4, W4, W4, W4, W5, W4, W8, W7	0.411/6.17/ W4		Не	
	3.	W3, W3, W4, W4, W4, W4, W4, W4, W7, W6	0.094/1.41		Да	
$j = 15$	1.	W3, W3, W4, W4, W4, W8, W7, W5, W6, W7	0.192/2.88	3.33	Да	((0.36,0.51,0.66;1), (0.41,0.51,0.61;0.85))
	2.	/	/		/	
	3.	/	/		/	

У наставку је приказана фази матрица одлучивања (Корак 5 предложеног алгоритма), формирана на основу процена доносилаца одлука (табела 5.18).

Табела 5.18 – Фази матрица одлучивања (Коматина и др., 2021)

j	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$j = 1$	V4	V5	V4	V4	V6
$j = 2$	V2	V5	V4	V6	V7
$j = 3$	V1	V6	V4	V6	V7
$j = 4$	V2	V6	V3	V7	V7
$j = 5$	V1	V6	V3	V5	V6
$j = 6$	V4	V7	V4	V6	V7
$j = 7$	V2	V7	V3	V6	V7
$j = 8$	V7	V7	V7	V7	V7
$j = 9$	V7	V7	V5	V5	V6
$j = 10$	V6	V6	V6	V6	V6
$j = 11$	V4	V6	V6	V7	V7
$j = 12$	V6	V5	V5	V5	V3
$j = 13$	V2	V7	V3	V6	V7
$j = 14$	V4	V6	V5	V7	V7
$j = 15$	V2	V6	V7	V5	V2

Отежана фази матрица одлучивања, као и фази позитивно идеално решење, \tilde{z}_j^+ , и фази негативно идеално решење, \tilde{z}_j^- дати су у табели 5.19 (Корак 6 и Корак 7 предложеног алгоритма).

Табела 5.19 – Отежана фази матрица одлучивања (Коматина и др., 2021)

j	$i = 1$	$i = 2$
$j = 1$	((1.02, 2.20, 3.84; 1), (1.36, 2.20, 4.43; 0.85))	((1.31, 2.64, 3.84; 1), (1.70, 2.64, 3.78; 0.85))
$j = 2$	((0.61, 1.90, 3.56; 1), (0.99, 1.90, 3.01; 0.85))	((2.75, 4.56, 6.68; 1), (3.30, 4.56, 6.02; 0.85))
$j = 3$	((0.45, 0.60, 2.63; 1), (0.50, 0.60, 2.10; 0.85))	((2.70, 4.50, 6.75; 1), (3.25, 4.50, 5.95; 0.85))
$j = 4$	((0.42, 1.43, 2.88; 1), (0.71, 1.43, 2.35; 0.85))	((2.52, 4.28, 6.48; 1), (3.06, 4.28, 5.07; 0.85))
$j = 5$	((0.11, 0.23, 1.23; 1), (0.15, 0.23, 0.93; 0.85))	((0.66, 1.73, 3.15; 1), (0.98, 1.73, 2.64; 0.85))
$j = 6$	((1.23, 2.50, 4.23; 1), (1.60, 2.50, 3.60; 0.85))	((2.63, 4.50, 5.85; 1), (3.20, 4.50, 5.40; 0.85))
$j = 7$	((0.19, 0.85, 1.96; 1), (0.36, 0.85, 1.54; 0.85))	((1.43, 3.06, 4.41; 1), (1.92, 3.06, 3.96; 0.85))
$j = 8$	((1.20, 2.76, 4.14; 1), (1.68, 2.76, 3.69; 0.85))	((1.20, 2.76, 4.14; 1), (1.68, 2.76, 3.69; 0.85))
$j = 9$	((2.55, 4.41, 5.76; 1), (3.12, 4.41, 5.31; 0.85))	((2.55, 4.41, 5.76; 1), (3.12, 4.41, 5.31; 0.85))
$j = 10$	((1.26, 2.70, 4.59; 1), (1.69, 2.70, 3.91; 0.85))	((1.26, 2.70, 4.59; 1), (1.69, 2.70, 3.91; 0.85))
$j = 11$	((1.47, 2.85, 4.68; 1), (1.88, 2.85, 4.02; 0.85))	((2.52, 4.28, 6.48; 1), (3.06, 4.28, 5.70; 0.85))
$j = 12$	((2.16, 3.83, 5.94; 1), (2.67, 3.83, 5.19; 0.85))	((1.62, 3.06, 4.95; 1), (2.05, 3.06, 4.27; 0.85))
$j = 13$	((0.33, 0.48, 2.21; 1), (0.38, 0.48, 1.74; 0.85))	((2.48, 4.32, 5.67; 1), (3.04, 4.32, 5.22; 0.85))
$j = 14$	((0.98, 2.15, 3.77; 1), (1.32, 2.15, 3.18; 0.85))	((2.48, 4.32, 5.67; 1), (3.04, 4.32, 5.22; 0.85))
$j = 15$	((0.36, 1.28, 2.64; 1), (0.62, 1.28, 2.14; 0.85))	((1.68, 3.23, 5.22; 1), (2.15, 3.23, 4.51; 0.85))
\tilde{z}_i^+	((2.55, 4.41, 5.94; 1), (3.12, 4.41, 5.31; 0.85))	((2.75, 4.56, 6.75; 1), (3.30, 4.56, 6.02; 0.85))
\tilde{z}_i^-	((0.11, 0.23, 1.23; 1), (0.15, 0.23, 0.93; 0.85))	((0.66, 1.73, 3.15; 1), (0.98, 1.73, 2.06; 0.85))

Табела 5.19 (наставак) – Отежана фази матрица одлучивања (*Коматина* и др., 2021)

j	$i = 3$	$i = 4$
$j = 1$	((1.02, 2.20, 3.84; 1), (1.36, 2.20, 3.24; 0.85))	((1.02, 2.20, 3.84; 1), (1.36, 2.20, 3.24; 0.85))
$j = 2$	((2.14, 3.80, 5.79; 1), (2.64, 3.80, 5.16; 0.85))	((3.66, 5.70, 8.01; 1), (4.29, 5.70, 7.31; 0.85))
$j = 3$	((3.38, 5.40, 6.75; 1), (4.00, 5.40, 6.30; 0.85))	((2.70, 4.50, 6.75; 1), (3.25, 4.50, 5.95; 0.85))
$j = 4$	((1.05, 2.28, 3.96; 1), (1.41, 2.28, 3.35; 0.85))	((3.15, 5.13, 6.48; 1), (3.76, 5.13, 6.03; 0.85))
$j = 5$	((0.28, 0.92, 1.93; 1), (0.45, 0.92, 1.55; 0.85))	((0.50, 1.38, 2.63; 1), (0.75, 1.38, 2.17; 0.85))
$j = 6$	((1.23, 2.50, 4.23; 1), (1.60, 2.50, 3.60; 0.85))	((2.10, 3.75, 5.85; 1), (2.60, 3.75, 5.410; 0.85))
$j = 7$	((0.48, 1.36, 2.70; 1), (0.72, 1.36, 2.20; 0.85))	((1.14, 2.55, 4.41; 1), (1.56, 2.55, 3.74; 0.85))
$j = 8$	((1.20, 2.76, 4.14; 1), (1.68, 2.76, 3.69; 0.85))	((1.20, 2.76, 4.14; 1), (1.68, 2.76, 3.69; 0.85))
$j = 9$	((1.53, 2.94, 4.80; 1), (1.95, 2.94, 4.13; 0.85))	((1.53, 2.94, 4.80; 1), (1.95, 2.94, 4.13; 0.85))
$j = 10$	((1.26, 2.70, 4.59; 1), (1.69, 2.70, 3.91; 0.85))	((1.26, 2.70, 4.59; 1), (1.69, 2.70, 3.91; 0.85))
$j = 11$	((2.52, 4.28, 6.48; 1), (3.06, 4.28, 5.70; 0.85))	((3.15, 5.13, 6.48; 1), (3.76, 5.13, 6.03; 0.85))
$j = 12$	((1.62, 3.06, 4.95; 1), (2.05, 3.06, 4.27; 0.85))	((1.62, 3.06, 4.95; 1), (2.05, 3.06, 4.27; 0.85))
$j = 13$	((0.83, 1.92, 3.47; 1), (1.14, 1.92, 2.90; 0.85))	((1.98, 3.60, 5.67; 1), (2.47, 3.60, 4.93; 0.85))
$j = 14$	((1.26, 2.58, 4.35; 1), (1.65, 2.58, 3.71; 0.85))	((2.10, 3.87, 5.22; 1), (2.64, 3.87, 4.77; 0.85))
$j = 15$	((2.70, 4.59, 5.94; 1), (3.28, 4.59, 5.49; 0.85))	((1.62, 3.06, 4.95; 1), (2.05, 3.06, 4.27; 0.85))
\tilde{z}_i^+	((2.70, 4.59, 6.48; 1), (3.28, 4.59, 5.70; 0.85))	((3.66, 5.70, 8.01; 1), (4.29, 5.70, 7.31; 0.85))
\tilde{z}_i^-	((0.28, 0.92, 1.93; 1), (0.45, 0.92, 1.55; 0.85))	((0.50, 1.38, 2.63; 1), (0.75, 1.38, 2.17; 0.85))

j	$i = 5$
$j = 1$	((1.74, 3.30, 5.31; 1), (2.21, 3.30, 4.59; 0.85))
$j = 2$	((4.58, 6.84, 8.01; 1), (5.28, 6.84, 7.79; 0.85))
$j = 3$	((3.38, 5.40, 6.75; 1), (4.00, 5.40, 6.30; 0.85))
$j = 4$	((3.15, 5.13, 6.48; 1), (3.76, 5.13, 6.03; 0.85))
$j = 5$	((0.66, 1.73, 3.15; 1), (0.98, 1.73, 2.64; 0.85))
$j = 6$	((2.63, 4.50, 5.85; 1), (3.20, 4.50, 5.40; 0.85))
$j = 7$	((1.43, 3.06, 4.41; 1), (1.92, 3.06, 3.96; 0.85))
$j = 8$	((1.20, 2.76, 4.14; 1), (1.68, 2.76, 3.69; 0.85))
$j = 9$	((2.04, 3.68, 5.76; 1), (2.54, 3.68, 5.02; 0.85))
$j = 10$	((1.26, 2.70, 4.59; 1), (1.69, 2.70, 3.91; 0.85))
$j = 11$	((3.15, 5.13, 6.48; 1), (3.76, 5.13, 6.03; 0.85))
$j = 12$	((0.90, 2.04, 3.63; 1), (1.23, 2.04, 3.05; 0.85))
$j = 13$	((2.48, 4.32, 5.67; 1), (3.04, 4.32, 5.22; 0.85))
$j = 14$	((2.10, 3.87, 5.22; 1), (2.64, 3.87, 4.77; 0.85))
$j = 15$	((0.36, 1.28, 2.64; 1), (0.62, 1.28, 2.14; 0.85))
\tilde{z}_i^+	((4.58, 6.84, 8.01; 1), (5.28, 6.84, 7.74; 0.85))
\tilde{z}_i^-	((0.36, 1.28, 2.64; 1), (0.62, 1.28, 2.14; 0.85))

Применом процедуре приказане у предложеном алгоритму (од *Корак* 8 до *Корак* 12) је одређен ранг разматраних *HOTRFs* применом метода *IT2FTOPSIS* и *IT2FSAW*. Ранг *HOTRFs* приказан је у табели 5.20.

Табела 5.20 – Ранг разматраних *HOTRFs* одређен применом метода *IT2FTOPSIS* и *IT2FSAW* (Komatina и др., 2021)

<i>HOTRFs</i>	c_j	Ранг одређен применом <i>IT2FTOPSIS</i>	$\tilde{\delta}_j$	γ_j	Ранг одређен применом <i>IT2FSAW</i>
$j = 1$	0.36	13	$\left((6.11, 12.54, 20.67; 1), (7.99, 12.54, 19.28; 0.85) \right)$	0.039	14
$j = 2$	0.85	1	$\left((13.74, 22.80, 32.05; 1), (16.50, 22.80, 29.29; 0.85) \right)$	0.085	2
$j = 3$	0.64	3	$\left((12.61, 20.40, 29.63; 1), (15, 20.40, 26.60; 0.85) \right)$	0.079	5
$j = 4$	0.61	4	$\left((10.29, 18.25, 26.28; 1), (12.70, 18.25, 22.83; 0.85) \right)$	0.069	9–10
$j = 5$	0.11	15	$\left((2.21, 5.99, 12.09; 1), (3.31, 5.99, 9.93; 0.85) \right)$	0.034	15
$j = 6$	0.59	6	$\left((9.82, 17.75, 26.01; 1), (12.20, 17.75, 23.41; 0.85) \right)$	0.071	7–8
$j = 7$	0.25	14	$\left((5.87, 12.32, 19.33; 1), (7.76, 12.32, 16.84; 0.85) \right)$	0.043	13
$j = 8$	0.38	12	$\left((6, 13.80, 20.70; 1), (8.40, 13.80, 18.45; 0.85) \right)$	0.051	12
$j = 9$	0.60	5	$\left((10.20, 18.38, 26.88; 1), (12.68, 18.38, 23.90; 0.85) \right)$	0.080	4
$j = 10$	0.41	10	$\left((6.30, 13.50, 22.95; 1), (8.45, 13.50, 19.55; 0.85) \right)$	0.058	11
$j = 11$	0.78	2	$\left((12.81, 21.67, 3.96; 1), (15.52, 21.67, 27.48; 0.85) \right)$	0.094	1
$j = 12$	0.48	8	$\left((7.92, 15.05, 24.42; 1), (10.05, 15.05, 21.05; 0.85) \right)$	0.069	9–10
$j = 13$	0.45	9	$\left((8.10, 14.67, 22.69; 1), (10.07, 14.67, 20.01; 0.85) \right)$	0.072	6
$j = 14$	0.49	7	$\left((8.92, 16.79, 24.23; 1), (11.26, 16.79, 21.65; 0.85) \right)$	0.081	3
$j = 15$	0.39	11	$\left((6.72, 13.44, 21.39; 1), (8.72, 13.44, 18.55; 0.85) \right)$	0.071	7–8

Упоређивањем резултата добијених применом метода *IT2FTOPSIS* и *IT2FSAW* може се закључити да је ранг разматраних *HOTRFs* стабилан. Два *HOTRFs* која у овом случају имају највећи утицај на безбедност и здравље радника на разматраним радним местима су искуство ($j = 2$) и техничке карактеристике опреме ($j = 11$). *HOTRFs* који имају најмањи утицај на безбедност и здравље радника на разматраним радним местима су односи ($j = 5$), организација и распоред радних задатака ($j = 7$) и персоналне карактеристике ($j = 1$).

Како би се додатно проверила стабилност добијеног решења израчунат је коефицијент сличности рангирања, WS (Корак 13 предложеног алгорита). Процедура развијена у раду (Salabun и Urbaniak, 2020) примењена је у два случаја, тј. када се провера стабилности ранга добијеног помоћу $IT2FTOPSIS$ врши на основу ранга добијеног применом $IT2FSAW$ методе и обрнуто. Резултати поступка приказани су у табели 5.21.

Табела 5.21 – Коефицијент сличности рангирања, WS (Komatina и др., 2021)

$HOTRFs$	Ранг одређен применом $IT2FTOPSIS$	Ранг одређен применом $IT2FSAW$	Ранг одређен применом $IT2FSAW$	Ранг одређен применом $IT2FTOPSIS$
$j = 1$	13	14	14	13
$j = 2$	1	2	2	1
$j = 3$	3	5	5	3
$j = 4$	4	9.5	9.5	4
$j = 5$	15	15	15	15
$j = 6$	6	7.5	7.5	6
$j = 7$	14	13	13	14
$j = 8$	12	12	12	12
$j = 9$	5	4	4	5
$j = 10$	10	11	11	10
$j = 11$	2	1	1	2
$j = 12$	8	9.5	9.5	8
$j = 13$	9	6	6	9
$j = 14$	7	3	3	7
$j = 15$	11	7.5	7.5	11
WS	0.8815		0.8814	

На основу коефицијената сличности рангирања који су приказани у претходној табели и препорука дефинисаних у раду (Salabun и Urbaniak, 2020), може се закључити да је стабилност ранга, односно конзистентност, веома висока. Тиме се потврђује да се добијени ранг $HOTRFs$ не мења значајно у зависности од примењене методе.

Резултати добијени применом предложене методологије, односно утврђени утицај $HOTRFs$ на безбедност и здравље радника на разматраним радним местима, треба да обезбеди менаџеру безбедности и здравља на раду полазни основ за спровођење одговарајућих мера које би довеле до повећања безбедности радника и унапређења поузданости процеса производње. Самим тим би се пројекат развоја новог производа могао реализовати на ефикаснији начин.

Два $HOTRFs$ која у овом случају имају највећи утицај на безбедност и здравље радника морају да буду посебно анализирана од стране менаџера безбедности и здравља на раду. Ова два $HOTRFs$ заправо указују на два веома честа проблема са којима се сусрећу многе компаније аутомобилске индустрије у Србији и региону. $HOTRF$ који се односи на искуство запослених ($j = 2$) указује на то да на тржишту рада нема довољно радника за искуством и да предузећа често запошљавају радну снагу одмах после завршеног школовања. Другим речима, радници се запошљавају у

предузећима директно из средњих школа и са факултета. Овај проблем би се могао решити увођењем адекватне стручне праксе за ученике и студенте на завршним годинама школовања, преваходно кроз формирање центара за обуку. Други од два најважнија *HOTRFs* су техничке карактеристике опреме ($j = 11$). То заправо указује да је опрема која се користи у процесу производње, иако употребљива и даје жељене резултате, ипак у одређеној мери застарела. Стога, разматрано предузеће би овај проблем могло да реши кроз набавку савремене производне опреме, преваходно кроз аплицирање за средства из различитих фондова за подршку привреди и томе слично (*Komatina* и др., 2021).

Основне предности предложеног модела су: 1) описивање разматраног проблема помоћу лингвистичких исказа, 2) постојеће неизвесности описане су применом *IT2TFNs*, 3) предложени модел се спроводи једноставно и брзо, 4) резултати који се одређују помоћу предложеног модела су јасни и лако разумљиви, 5) све промене, попут промена релативних важности *HOTRFs*, могу се једноставно инкорпорирати у модел и б) може се применити за анализу ризика на било ком радном месту. Као главни теоријски допринос овог истраживања може се истаћи начин провере постизања консензуса доносилаца одлука приликом процене релативне важности *HOTRFs*. Као основно ограничење предложеног модела може се истаћи избор одговарајуће групе доносилаца одлука. Заправо, од доносилаца одлука зависи поузданост улазних података, што касније има утицај и на само решење. Стога, будућа истраживања треба да буду заснована на бенчмаркинг резултата који би били добијени применом предложеног модела у другим компанијама аутомобилске индустрије (*Komatina* и др., 2021).

5.5 ОДРЕЂИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ СКУПА НАЧИНА ОТКАЗА ЗАСНОВАНО НА *IT2FANP* И МЕТАХЕУРИСТИЧКОМ ПРИСТУПУ

Студија случаја приказана у овом потпоглављу спроведена је на пет различитих узорака, односно пет различитих *PFMEA* извештаја, који потичу из три предузећа аутомобилске индустрије. Разматрана предузећа су добављачи првог реда у ланцу снабдевања. Као што је и већ речено у потпоглављу 4.5, у моделу се осим стандардних вредности фактора ризика S , O и D , у обзир узимају и трошкови одржавања (c_{1t}) и трошкови застоја који настају услед реализације идентификованих начина отказа (\tilde{c}_{2t}). Сваки од разматраних фактора ризика има различиту тежину, која је одређена применом *IT2FANP* методе, а на основу процена *FMEA* тима сваког предузећа. Сваки *FMEA* тим своје процене доноси консензусом (*Komatina* и др., 2023).

Применом фази метода осредњавања је извршена агрегација вектора тежина разматраних фактора ризика. Стога, тежине фактора ризика одређене применом *IT2FANP* методе и касније агрегиране, могу се записати на следећи начин (*Komatina* и др., 2023):

$$\tilde{W}_1 = ((0.18, 0.69, 1.52; 1), (0.35, 0.69, 1.05; 0.7))$$

$$\tilde{W}_2 = ((0.1, 0.19, 0.89; 1), (0.14, 0.19, 0.49; 0.7))$$

$$\tilde{W}_3 = ((0.06, 0.11, 0.52; 1), (0.08, 0.11, 0.24; 0.7))$$

У овом случају, \tilde{W}_1 је тежина фактора ризика S , \tilde{W}_2 је тежина фактора ризика O и \tilde{W}_3 је тежина фактора ризика D . У табели 5.22 приказани су улазни подаци, односно процењене вредности фактора ризика и вредности трошкова. Као пример, дат је узорак у коме је разматрано 93 начина отказа.

Табела 5.22 – Улазни подаци за четврти узорак (93 начина отказа)

Начин отказа	S	O	D	$c_{1t} \cdot 10^2$ РСД	\tilde{c}_{2t}
$t = 1$	9	2	4	5	C3
$t = 2$	9	2	4	100	C5
$t = 3$	7	2	3	80	C1
$t = 4$	7	1	2	5	C2
$t = 5$	7	2	1	50	C2
$t = 6$	6	5	1	80	C1
$t = 7$	6	1	1	80	C2
$t = 8$	6	2	4	45	C2
$t = 9$	9	2	3	5	C7
$t = 10$	9	2	3	10	C5
$t = 11$	9	3	3	90	C4
$t = 12$	9	2	3	5	C1
$t = 13$	9	1	3	20	C3
$t = 14$	9	2	3	30	C2
$t = 15$	9	2	3	5	C4
$t = 16$	9	1	2	5	C5
$t = 17$	9	2	3	30	C1
$t = 18$	9	2	4	15	C2
$t = 19$	9	2	3	10	C7
$t = 20$	9	3	3	12	C6
$t = 21$	9	2	3	45	C1
$t = 22$	9	2	3	5	C2
$t = 23$	9	3	3	10	C3
$t = 24$	9	2	3	20	C4
$t = 25$	9	1	3	5	C5
$t = 26$	9	2	3	5	C6
$t = 27$	9	2	3	5	C7
$t = 28$	9	1	2	5	C4
$t = 29$	9	2	3	5	C6
$t = 30$	9	2	4	5	C2
$t = 31$	8	2	3	15	C1
$t = 32$	9	2	3	40	C1
$t = 33$	7	2	2	20	C5
$t = 34$	7	1	1	5	C5
$t = 35$	8	2	2	10	C6
$t = 36$	6	5	3	5	C1
$t = 37$	6	1	3	5	C1
$t = 38$	9	2	3	10	C1
$t = 39$	9	2	3	5	C5
$t = 40$	9	3	3	5	C7
$t = 41$	9	2	3	5	C2
$t = 42$	9	1	3	5	C6
$t = 43$	9	2	3	5	C5
$t = 44$	9	2	3	5	C6
$t = 45$	9	1	2	5	C7
$t = 46$	9	2	3	5	C3
$t = 47$	9	2	4	95	C4
$t = 48$	9	2	3	5	C3
$t = 49$	9	2	3	10	C2

Табела 5.22 (наставак) – Улазни подаци за четврти узорак (93 начина отказа)

Начин отказа	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	$c_{1t} \cdot 10^2$ РСД	\tilde{c}_{2t}
<i>t</i> = 50	9	2	3	5	<i>C6</i>
<i>t</i> = 51	9	3	3	5	<i>C1</i>
<i>t</i> = 52	9	2	3	5	<i>C5</i>
<i>t</i> = 53	9	1	3	5	<i>C7</i>
<i>t</i> = 54	9	2	3	5	<i>C2</i>
<i>t</i> = 55	9	2	3	5	<i>C3</i>
<i>t</i> = 56	9	1	2	5	<i>C5</i>
<i>t</i> = 57	9	2	3	10	<i>C4</i>
<i>t</i> = 58	9	2	4	10	<i>C6</i>
<i>t</i> = 59	9	2	3	5	<i>C6</i>
<i>t</i> = 60	9	2	3	5	<i>C3</i>
<i>t</i> = 61	7	2	2	55	<i>C5</i>
<i>t</i> = 62	7	1	1	15	<i>C1</i>
<i>t</i> = 63	8	2	3	5	<i>C7</i>
<i>t</i> = 64	6	5	1	15	<i>C4</i>
<i>t</i> = 65	6	1	3	5	<i>C5</i>
<i>t</i> = 66	9	2	3	5	<i>C5</i>
<i>t</i> = 67	9	2	3	5	<i>C7</i>
<i>t</i> = 68	9	3	3	5	<i>C4</i>
<i>t</i> = 69	9	2	3	10	<i>C4</i>
<i>t</i> = 70	9	1	3	15	<i>C1</i>
<i>t</i> = 71	9	2	3	5	<i>C7</i>
<i>t</i> = 72	9	2	3	5	<i>C3</i>
<i>t</i> = 73	9	1	2	10	<i>C4</i>
<i>t</i> = 74	8	2	3	5	<i>C4</i>
<i>t</i> = 75	8	2	4	5	<i>C7</i>
<i>t</i> = 76	8	2	3	5	<i>C1</i>
<i>t</i> = 77	8	2	1	5	<i>C6</i>
<i>t</i> = 78	7	2	2	45	<i>C5</i>
<i>t</i> = 79	7	1	1	55	<i>C1</i>
<i>t</i> = 80	8	2	2	15	<i>C2</i>
<i>t</i> = 81	7	5	3	5	<i>C7</i>
<i>t</i> = 82	7	4	3	5	<i>C2</i>
<i>t</i> = 83	8	2	3	5	<i>C3</i>
<i>t</i> = 84	8	2	3	5	<i>C4</i>
<i>t</i> = 85	8	4	3	5	<i>C4</i>
<i>t</i> = 86	8	2	3	5	<i>C6</i>
<i>t</i> = 87	8	1	3	5	<i>C5</i>
<i>t</i> = 88	8	2	3	5	<i>C5</i>
<i>t</i> = 89	8	2	3	5	<i>C6</i>
<i>t</i> = 90	8	1	2	5	<i>C6</i>
<i>t</i> = 91	8	2	3	5	<i>C4</i>
<i>t</i> = 92	8	2	4	5	<i>C5</i>
<i>t</i> = 93	8	2	3	5	<i>C7</i>

У Прилогу су табеларно дати улазни подаци који су даље коришћени у примени Генетског алгоритма и Методе променљивих околина. Приказани подаци су претходно обрађени, узимајући у обзир тежине разматраних фактора ризика. Такође, улазни подаци су претходно дефазификовани и агрегирани.

Применом *Корак 7* предложеног алгоритма (видети секцију 4.5.3), одређено је приближно оптимално решење, применом Генетског алгоритма и Методе променљивих околина. За свих пет узорака, односно *PFMEA* извештаја, решење је пронађено применом обе ове методе у релативно кратком временском периоду. У табели 5.23 приказани су резултати добијени применом Генетског алгоритма, док су у табели 5.24 приказани резултати добијени применом Методе променљивих околина.

Табела 5.23 – Оптималан скуп начина отказа на нивоу сваког анализираног *FMEA* извештаја одређен применом Генетског алгоритма (*Komatina* и др., 2023)

Величина узорка	Генетски алгоритам			
	Оптимално решење	Број итерација	Време у секундама	Вредност <i>fitness-a</i>
25	2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 22, 23, 24	386	1,346	281.278
50	4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 24, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 45, 46, 47, 48, 49, 50	18.663	52,144	525.150
87	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 61, 62, 64, 65, 66, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 81, 84, 85, 86	66.913	265,151	836.380
93	1, 4, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 62, 65, 66, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 76, 77, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92	7.697	108,019	1.459.638
146	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 34, 37, 39, 40, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 93, 98, 99, 100, 101, 102, 105, 106, 111, 112, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 139, 141, 142, 143, 144, 145, 146	244.727	1446,337	1.713.944

Табела 5.24 – Оптималан скуп начина отказа на нивоу сваког анализираног *FMEA* извештаја одређен применом Методе променљивих околина (*Komatina* и др., 2023)

Величина узорка	Метода променљивих околина			
	Оптимално решење	Број итерација	Време у секундама	Вредност <i>fitness-a</i>
25	2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 22, 23, 24	206	1,194	281.278
50	4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 24, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 45, 46, 47, 48, 49, 50	75	0,646	525.150
87	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 61, 62, 64, 65, 66, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 81, 84, 85, 86	400	3,406	836.380
93	1, 4, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 62, 65, 66, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 76, 77, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92	446	4,327	1.459.638
146	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 34, 37, 39, 40, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 93, 98, 99, 100, 101, 102, 105, 106, 111, 112, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 139, 141, 142, 143, 144, 145, 146	4.371	102,612	1.713.944

Као што се може видети у табелама 5.23 и 5.24, применом предложене методологије, одређен је скуп начина отказа који имају потенцијално највећи утицај, како на процес производње, тако и на целокупно пословање предузећа. Осим тога, јасно се може видети да примена обе метахеуристичке методе даје идентичне резултате. У том смислу, може се сматрати да је добијено решење стабилно и довољно поуздано (*Komatina* и др., 2023).

Представљени модел, тестиран на претходној студији случаја, има за циљ да (*Komatina* и др., 2023):

- унапреди традиционалну *PFMEA* анализу и
- аутоматизује поступак избора начина отказа на чије узроке појаве треба деловати.

Код традиционалне *FMEA* и *PFMEA* анализе избор скупа начина отказа зависи од њиховог приоритета (вредност *RPN* параметра или приоритет одређен помоћу *AP* методологије), као и расположивог буџета. Као веома важни фактори у овом поступку истичу се знање и искуство чланова *FMEA* тима. Стога, може се рећи да је поступак избора начина отказа, на чије узроке треба деловати, у великој мери оптерећен субјективним проценама и ставовима чланова *FMEA* тима. У том смислу, предложени модел аутоматизује поступак одређивања оптималног скупа начина отказа, чиме се *FMEA* тиму пружа подршка у процесу одлучивања.

Модел је у довољној мери флексибилан, тако да се може применити и на друге *FMEA* проблеме, кроз промену броја начина отказа, као и кроз промену броја и релативне важности критеријума. Као практични допринос истраживања може се истаћи развој два метахеуристичка алгорита, чијом применом се смањује субјективност доносилаца одлука и потенцијално повећава тачност у одлучивању. Ипак, субјективност доносилаца одлука се не може потпуно избећи и присутна је приликом процене вредности фактора ризика, као и приликом процене њихове релативне важности (*Komatina* и др., 2023).

У циљу побољшања предложеног модела, правци будућих истраживања се могу усмерити на (прилагођено из *Komatina* и др., 2023): 1) укључивање нових фактора ризика, 2) проширење фактора ризика *S*, увођењем нових аспеката, попут важности производа, трошкова и сл., 3) модификацију предложеног метахеуристичког приступа, увођењем нових функција циља и ограничења и 4) применом предложеног модела у различитим индустријским доменима.

6. ЗАКЉУЧАК

У овој докторској дисертацији је разматран проблем унапређења процеса производње, првенствено кроз побољшање његове поузданости, применом модификоване *PFMEA* анализе и различитих оптимизационих метода. У оквиру реализованих истраживања, развијено је пет оптимизационих модела. Реални подаци из праксе, који су добијени из различитих предузећа аутомобилске индустрије, коришћени су за тестирање предложених модела.

Први модел, приказан у потпоглављу 4.1, развијен је са циљем да се унапреди конвенционална *PFMEA* анализа. У овом моделу се разматрају три аспекта фактора ризика S , а то су важност производа, квалитет и трошкови. Тежине ових аспеката одређене су применом *IT2FBWM* методе. Одређивање приоритета начина отказа прилагођено је *AP* методологији, чиме се врши интеграција предложеног модела са поступком дефинисаним у последњој верзији *FMEA* приручника за аутомобилску индустрију. Модел је тестиран у предузећу које је добављач првог реда у ланцу снабдевања. Основна делатност предузећа је производња текстилних компонената ентеријера аутомобила.

Студија случаја, реализована у циљу тестирања овог модела, показала је да увођење додатних аспеката фактора ризика S може у значајној мери да утиче на његову укупну вредност. То се даље може одразити и на приоритет начина отказа, што је био случај код два, од укупно три, анализирана *PFMEA* извештаја. Другим речима, поједини начини отказа који су применом стандардне *PFMEA* анализе имали низак приоритет, применом предложеног модела сврставају се у групу средњег приоритета. То значи да је за ове начине отказа потребно предузети одговарајуће мере како би се њихов утицај елиминисао или у довољној мери смањио. Према стандардној *PFMEA* процедури, ови начини отказа не захтевају спровођење било каквих мера, што би, у случају њихове реализације, могло имати негативан утицај на поузданост процеса производње.

Други модел представљен у овој докторској дисертацији тестиран је на подацима који потичу из истог предузећа као и подаци на којима је тестиран први модел. Модел који је приказан у потпоглављу 4.2 заснива се на примени две методе вишеатрибутивног одлучивања, односно *IT2FBWM* и *IT2FVIKOR* методе. За разлику од првог модела, други модел разматра само трошковни аспект фактора ризика S , односно трошкове који могу да настану услед застоја у производном процесу, управо као последица реализације разматраних начина отказа. Међутим, аспект трошкова се у овом случају разматра као посебан фактор ризика, односно као посебан критеријум. На тај начин се одређивање приоритета начина отказа врши респектовањем четири критеријума. Тежине разматраних критеријума одређене су применом *IT2FBWM* методе, док је приоритет начина отказа одређен применом *IT2FVIKOR* методе.

За разлику од конвенционалне *PFMEA* анализе, али и постојећих *IT2FMADM* приступа развијених у циљу одређивања ранга начина отказа, предложени модел одређује редослед којим најзначајније начине отказа треба третирати. На тај начин се оперативном менаџменту сугерише за које начине отказа сигурно треба предузети одговарајуће мере.

Предложени модел искључује коришћење *RPN* параметра, на чије недостатке су указали многи аутори. Такође, на приоритет начина отказа, осим стандардних фактора ризика, утичу и трошкови застоја у производном процесу, који настају услед реализације потенцијалних начина отказа. Укључивањем трошковног аспекта као четвртог фактора ризика, предложени модел на бољи начин може да анализира идентификоване начине отказа, него што је то случај са применом конвенционалне *PFMEA* анализе.

Проблем оцене и избора добављача у аутомобилској индустрији разматран је у потпоглављу 4.3, у коме је и приказан предложени модел за решавање овог проблема. Модел се заснива на примени *IT2FAHP* методе за одређивање тежина критеријума на основу којих се врши оцена и избор добављача, док је *IT2FMABAC* метода коришћена као алат за одређивање скупа потенцијалних добављача. Студија случаја, на којој је тестиран предложени модел, реализована је из перспективе предузећа које је оригинални произвођач опреме у ланцу снабдевања у аутомобилској индустрији.

Применом предложеног модела, чему и доприноси примена *IT2FMABAC* методе, као резултат се добија скуп прихватљивих и неприхватљивих добављача. Другим речима, примена предложеног модела пружа менаџменту упутство о томе која предузећа треба разматрати као потенцијалне добављаче, а која предузећа не испуњавају захтеване услове, односно критеријуме. Ова карактеристика предложеног модела се може означити као једна од најважнијих предности у односу на приступе у којима су примењене неке друге *MADM* методе.

У потпоглављу 4.4 представљен је модел за анализу фактора који утичу на безбедност и здравље запослених на радном месту у аутомобилској индустрији. Овај модел је тестиран на подацима који потичу из предузећа које је добављач првог реда у ланцу снабдевања, чија је делатност производња гумених делова и компонената. Истраживање је спроведено на пет различитих радних места. Као резултат истраживања, одређени су фактори који имају највећи утицај на безбедност и здравље радника на разматраним радним местима. На овај начин се менаџеру безбедности и здравља на раду и одговорним лицима обезбеђује основ за спровођење одговарајућих мера које могу да доведу до повећања безбедности радника и које би потенцијално утицале на очување њиховог здравља.

Предложени модел се заснива на примени модификоване Делфи методе, проширене применом *IT2TFNs*, која је коришћена за одређивање важности фактора који утичу на безбедност и здравље радника. Коначно, применом метода *IT2FTOPSIS* и *IT2FSAW*, утврђен је ранг ових фактора, односно њиховог утицаја на разматрана радна места. Важна карактеристика предложеног модела је његова разумљивост и могућност прилагођавања различитим проблемима у домену анализе и процене ризика на радним местима.

Пети развијени модел (потпоглавље 4.5) у овој докторској дисертацији односи се на примену хеуристичких, односно метахеуристичких метода, за одређивање приоритета начина отказа. У овом моделу, коришћене су две хеуристичке методе, односно Генетски алгоритам и Метода променљивих околина. Студија случаја на којој је тестиран развијени модел заснива се на подацима који потичу из три предузећа која су добављачи првог реда у ланцу снабдевања у аутомобилској индустрији.

Као најважнији резултат примене предложеног модела може се означити одређивање укупног приоритета начина отказа, узимајући у обзир њихов приоритет добијен применом стандардне *PFMEA* анализе, али и узимајући у обзир два важна фактора, а то су трошкови одржавања и трошкови застоја који настају као последица њихове реализације. Такође, као критеријум заустављања претраге у обзир је узет и расположиви буџет за спровођење активности одржавања. Овај укупни приоритет начина отказа се може представити и као редослед којим идентификоване начине отказа треба третирати. Другим речима, предложени модел одређује скуп начина отказа који имају апсолутни приоритет у спровођењу одговарајућих мера за елиминисање или смањење њиховог утицаја.

У уводном делу, односно на самом почетку истраживања, дефинисане су полазне хипотезе. Ове хипотезе су доказане кроз развој и примену предложених модела. У наставку је изложена анализа постављених хипотеза истраживања.

*Хипотеза 1: Процена озбиљности последица са респектовањем више аспеката као и коришћењем теорије фази скупова и правила фази алгебре значајно могу да повећају поузданост резултата *PFMEA* анализе у аутомобилској индустрији.*

Разматрана хипотеза је тестирана и доказана кроз примену прва два предложена модела (потпоглавље 4.1 и 4.2). У две спроведене студије случаја (потпоглавље 5.1 и 5.2), фактор ризика озбиљност последице (*S*) разматран је са више аспеката. У првом моделу, поред аспекта квалитета, уведени су и аспект важности производа и аспект трошкова, док је у другом моделу као четврти фактор ризика додат трошковни аспект фактора ризика *S*. У оба ова модела коришћени су *IT2FNs* за описивање неизвесности и непрецизности које егзистирају у разматраним проблемима, с тим што су у првом моделу коришћени *IT2TrFNs*, док су у другом моделу коришћени *IT2TFNs*, респективно. Реализоване студије случаја указују на то да примена предложених модела у великој мери може да утиче на поступак одређивања приоритета начина отказа, односно на повећање поузданости примене *PFMEA* анализе и њених резултата.

Хипотеза 2: Редослед елиминисања грешака може да се постави као оптимизациони задатак и решење се налази применом метахеуристичких метода; на овај начин конкурентност аутомобилске компаније, током дужег временског периода, може да се оствари.

Модел приказан у потпоглављу 4.5, који је примењен у студији случаја приказаној у потпоглављу 5.5, директно се односи на тестирање и потврђивање изнете хипотезе. Применом две метахеуристичке методе, односно Генетског алгорита и Методе променљивих околина, одређен је редослед којим идентификоване начине отказа треба третирати. Предложени модел, за сваки разматрани *PFMEA* извештај, одређује скуп начина отказа које примарно треба разматрати и анализирати. На овај начин се *FMEA* тиму и менаџменту у значајној мери олакшава овај важан оперативни задатак. Значај предложеног модела је још већи, узимајући у обзир чињеницу да стандардна (*P*)*FMEA* анализа не даје упутство о томе којим редоследом начине отказа треба третирати, што се применом предложеног модела, кроз разматрање вредности трошкова одржавања и трошкова застоја, може довољно поуздано утврдити. На овај начин се потврђује изнета хипотеза.

Кроз преостала два предложена модела (потпоглавље 4.3 и 4.4), тестирана на студијама случаја приказаним у потпоглављима 5.3 и 5.4, решавају се проблеми који могу имати велики утицај на поузданост реализације процеса производње. На овај начин се истраживање, осим на примену *IT2FNs* и *IT2FMADM* метода за унапређење *PFMEA* анализе, проширује и на њихову примену за решавање других важних проблема у аутомобилској индустрији, какви су оцена и избор добављача, као и анализа фактора који утичу на безбедност и здравље запослених.

Доприноси предложених модела, осим у ово поглављу, представљени су и детаљно описани у потпоглављима у којима су приказане студије случаја. Неки од доприноса који су општи и заједнички за све предложене моделе су: 1) коришћење *IT2FNs* за моделовање непрецизних и неизвесних вредности које егзистирају у разматраним проблемима и 2) проширење и унапређење конвенционалних метода. Осим предности, предложени модели имају и одређена ограничења која се уопштено огледају у: 1) субјективности доносилаца одлука и 2) комплексности прорачуна.

Предложени модели су довољно флексибилни да се уз одређене модификације могу применити за решавање истих или сличних проблема у другим гранама индустрије, што се може означити као један од праваца будућих истраживања. Осим тога, правци будућих истраживања биће усмерени на: 1) проширење *PFMEA* анализе увођењем додатних фактора ризика и њихових аспеката, 2) примену других *MADM* метода за решавање проблема у аутомобилској и другим гранама индустрије, 3) описивање непрецизних и неизвесних вредности применом различитих типова фази бројева, 4) примену различитих хеуристичких метода за одређивање приоритета начина отказа и 5) развој адекватних софтверских решења, како би се олакшала примена развијених оптимизационих модела.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Abbasgholizadeh Rahimi, S., Jamshidi, A., Ait-Kadi, D., & Ruiz, A. (2015). Using fuzzy cost-based FMEA, GRA and profitability theory for minimizing failures at a healthcare diagnosis service. *Quality and Reliability Engineering International*, 31(4), 601-615.
- [2] Abdelgawad, M., & Fayek, A. R. (2010). Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 1028-1036.
- [3] Ahmad, M. F., Sobri, S. A., Abdullah, N. N., Kamarudin, N. N., Mohamed, M., Hermawan, A., ... & Norizan, M. N. (2021). Failure mode and effects analysis (FMEA) of furniture production: A case study in Kelantan state, Malaysia. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2339, No. 1, p. 020025). AIP Publishing LLC.
- [4] Ahmadi, H. B., Kusi-Sarpong, S., & Rezaei, J. (2017). Assessing the social sustainability of supply chains using Best Worst Method. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 99-106.
- [5] AIAG – Automotive Industry Action Group, Званични сајт „Акционе групе за аутомобилску индустрију”, интернет адреса: <https://www.aiag.org>, датум приступа: 11. 02. 2020.
- [6] AIAG&VDA (2019). *Failure Mode and Effects Analysis - FMEA Handbook: design FMEA, process FMEA, supplemental FMEA for monitoring & system response*. Southfield, Michigan: Automotive Industry Action Group.
- [7] Aisbett, J., Rickard, J. T., & Morgenthaler, D. G. (2010). Type-2 fuzzy sets as functions on spaces. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 18(4), 841-844.
- [8] Albadr, M. A., Tiun, S., Ayob, M., & Al-Dhief, F. (2020). Genetic algorithm based on natural selection theory for optimization problems. *Symmetry*, 12(11), 1758.
- [9] Aleksić, A., Milanović, D. D., Komatina, N., & Tadić, D. (2023). Evaluation and ranking of failures in manufacturing process by combining best-worst method and VIKOR under type-2 fuzzy environment. *Expert Systems*, 40(2), e13148.
- [10] Aleksić, A., Runić Ristić, M., Komatina, N., & Tadić, D. (2019). Advanced risk assessment in reverse supply chain processes: A case study in Republic of Serbia. *Advances in Production Engineering & Management*, 14(4), 421-434.
- [11] Alinezhad, A., & Amini, A. (2011). Sensitivity analysis of TOPSIS technique: the results of change in the weight of one attribute on the final ranking of alternatives. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 7(1), 23-28.
- [12] Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). *New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM)* (Vol. 277). Cham: Springer.
- [13] Amini, A., & Nikraz, N. (2016). Proposing two defuzzification methods based on output fuzzy set weights. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 8(2), 1-12.

- [14] Amiri, M., Hashemi-Tabatabaei, M., Ghahremanloo, M., Keshavarz-Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., & Banaitis, A. (2021). A new fuzzy BWM approach for evaluating and selecting a sustainable supplier in supply chain management. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 28(2), 125-142.
- [15] Arabian-Hoseynabadi, H., Oraee, H., & Tavner, P. J. (2010). Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(7), 817-824.
- [16] Araújo Júnior, C. A., Mendes, J. B., Assis, A. L. D., Cabacinha, C. D., Stocks, J. J., Silva, L. F. D., & Leite, H. G. (2018). Tuning of the metaheuristic variable neighborhood search for a forest planning problem. *Cerne*, 24, 259-268.
- [17] Awasthi, A., Govindan, K., & Gold, S. (2018). Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach. *International Journal of Production Economics*, 195, 106-117.
- [18] Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., Odigie, O., & Munda, J. L. (2018). A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria. *Applied Energy*, 228, 1853-1869.
- [19] Ayyildiz, E., Gumus, A. T., & Erkan, M. (2020). Individual credit ranking by an integrated interval type-2 trapezoidal fuzzy Electre methodology. *Soft Computing*, 24(21), 16149-16163.
- [20] Azam, M. H., Hasan, M. H., Hassan, S., & Abdulkadir, S. J. (2020). Fuzzy type-1 triangular membership function approximation using fuzzy C-means. In *2020 International Conference on Computational Intelligence (ICCI)* (pp. 115-120). IEEE.
- [21] Bakar, A. S. A., Mohamad, D., & Sulaiman, N. H. (2012). Distance-based ranking fuzzy numbers. *Advances in Computational Mathematics and its applications*, 1(3), 146-150.
- [22] Bandaru, S., & Deb, K. (2016). Metaheuristic techniques. *Decision sciences*, 693-750.
- [23] Banduka, N., Aleksić, A., Komatina, N., Aljinović, A., & Tadić, D. (2020). The prioritization of failures within the automotive industry: The two-step failure mode and effect analysis integrated approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(12), 1559-1570.
- [24] Banduka, N., Tadić, D., Mačuzić, I., & Crnjac, M. (2018). Extended process failure mode and effect analysis (PFMEA) for the automotive industry: The FSQC-PFMEA. *Advances in Production Engineering & Management*, 13(2), 206-215.
- [25] Banduka, N., Veža, I., & Bilić, B. (2016). An integrated lean approach to Process Failure Mode and Effect Analysis (PFMEA): A case study from automotive industry. *Advances in Production Engineering & Management*, 11(4), 206-215.
- [26] Bařhan, V., Demirel, H., & Gul, M. (2020). An FMEA-based TOPSIS approach under single valued neutrosophic sets for maritime risk evaluation: the case of ship navigation safety. *Soft Computing*, 24(24), 18749-18764.
- [27] Belu, N., Rachieru, N., Militaru, E., & Anghel, D. C. (2012). Application of FMEA method in product development stage. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 10(3).
- [28] Boral, S., & Chakraborty, S. (2021). Failure analysis of CNC machines due to human errors: An integrated IT2F-MCDM-based FMEA approach. *Engineering Failure Analysis*, 130, 105768.

- [29] Boral, S., Howard, I., Chaturvedi, S. K., McKee, K., & Naikan, V. N. A. (2020). An integrated approach for fuzzy failure modes and effects analysis using fuzzy AHP and fuzzy MAIRCA. *Engineering Failure Analysis*, 108, 104195.
- [30] Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European journal of operational research*, 24(2), 228-238.
- [31] Bustince, H., Barrenechea, E., Pagola, M., Fernandez, J., Xu, Z., Bedregal, B., ... & De Baets, B. (2015). A historical account of types of fuzzy sets and their relationships. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 24(1), 179-194.
- [32] Cao, X., & Deng, Y. (2019). A new geometric mean FMEA method based on information quality. *IEEE Access*, 7, 95547-95554.
- [33] Carlson, C. (2012). *Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis* (Vol. 1). John Wiley & Sons.
- [34] Carlson, C. S. (2015). Understanding and applying the fundamentals of FMEAs. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium* (Vol. 10, pp. 1-35).
- [35] Carter, J. (2021). *Fuzzy Logic: Recent Applications and Developments*. Springer Nature.
- [36] Castellan, N. J. (1993). *Individual and group decision making: current issues*, 1st Edition, Psychology Press. New York.
- [37] Celik, E., & Gumus, A. T. (2018). An assessment approach for non-governmental organizations in humanitarian relief logistics and an application in Turkey. *Technological and Economic Development of Economy*, 24(1), 1-26.
- [38] Celik, E., Gul, M., Aydin, N., Gumus, A. T., & Guneri, A. F. (2015). A comprehensive review of multi criteria decision making approaches based on interval type-2 fuzzy sets. *Knowledge-Based Systems*, 85, 329-341.
- [39] Celik, E., Gumus, A. T., & Alegoz, M. (2014). A trapezoidal type-2 fuzzy MCDM method to identify and evaluate critical success factors for humanitarian relief logistics management. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 27(6), 2847-2855.
- [40] Celik, E., Yucesan, M., & Gul, M. (2021). Green supplier selection for textile industry: a case study using BWM-TODIM integration under interval type-2 fuzzy sets. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-25.
- [41] Cevik Onar, S., Oztaysi, B., & Kahraman, C. (2014). Strategic decision selection using hesitant fuzzy TOPSIS and interval type-2 fuzzy AHP: a case study. *International Journal of Computational intelligence systems*, 7(5), 1002-1021.
- [42] Chakhar, S., & Mousseau, V. (2008). Spatial multicriteria decision making. *Encyclopedia of GIS*, 10, 978-985.
- [43] Chakraborty, S., & Yeh, C. H. (2007). A simulation based comparative study of normalization procedures in multiattribute decision making. In *Proceedings of the 6th Conference on 6th WSEAS Int. Conf. on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases* (Vol. 6, pp. 102-109).
- [44] Chang, C. L., Wei, C. C., & Lee, Y. H. (1999). Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. *Kybernetes*.

- [45] Chang, K. H., Chang, Y. C., & Lai, P. T. (2014). Applying the concept of exponential approach to enhance the assessment capability of FMEA. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(6), 1413-1427.
- [46] Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9.
- [47] Chen, C. T. (2001). A fuzzy approach to select the location of the distribution center. *Fuzzy sets and systems*, 118(1), 65-73.
- [48] Chen, S. M., & Lee, L. W. (2010). Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the interval type-2 TOPSIS method. *Expert systems with applications*, 37(4), 2790-2798.
- [49] Chen, T. Y. (2013). A linear assignment method for multiple-criteria decision analysis with interval type-2 fuzzy sets. *Applied soft computing*, 13(5), 2735-2748.
- [50] Chen, T. Y. (2014). An ELECTRE-based outranking method for multiple criteria group decision making using interval type-2 fuzzy sets. *Information Sciences*, 263, 1-21.
- [51] Danesh, D., Ryan, M. J., & Abbasi, A. (2018). Multi-criteria decision-making methods for project portfolio management: a literature review. *International Journal of Management and Decision Making*, 17(1), 75-94.
- [52] De Aguiar, D. C., Salomon, V. A. P., & Mello, C. H. P. (2015). An ISO 9001 based approach for the implementation of process FMEA in the Brazilian automotive industry. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 32(6), 589-602.
- [53] Dereli, T., Baykasoglu, A., Altun, K., Durmusoglu, A., & Türksen, I. B. (2011). Industrial applications of type-2 fuzzy sets and systems: A concise review. *Computers in industry*, 62(2), 125-137.
- [54] Detyniecki, M. (2001). Fundamentals on aggregation operators. *This manuscript is based on Detyniecki's doctoral thesis and can be downloaded from*.
- [55] Diwekar, U. M. (2020). *Introduction to applied optimization* (Vol. 22). Springer Nature.
- [56] Dokeroglu, T., Sevinc, E., Kucukyilmaz, T., & Cosar, A. (2019). A survey on new generation metaheuristic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106040.
- [57] Dong, J., Wan, S., & Chen, S. M. (2021). Fuzzy best-worst method based on triangular fuzzy numbers for multi-criteria decision-making. *Information Sciences*, 547, 1080-1104.
- [58] Duckstein, L., Tecele, A., Nachnebel, H. P., & Hobbs, B. F. (1989). Multicriterion analysis of hydropower operation. *Journal of Energy Engineering*, 115(3), 132-153.
- [59] Đapan, M. J., Tadic, D. P., Macuzic, I. D., & Dragojovic, P. D. (2015). A new fuzzy model for determining risk level on the workplaces in manufacturing small and medium enterprises. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 229(5), 456-468.
- [60] Đurić, G., Mitrović, Č., Komatina, N., Tadić, D., & Vorotović, G. (2019). The hybrid MCDM model with the interval Type-2 fuzzy sets for the software failure analysis. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37(6), 7747-7759.
- [61] Dweiri, F., Kumar, S., Khan, S. A., & Jain, V. (2016). Designing an integrated AHP based decision support system for supplier selection in automotive industry. *Expert Systems with Applications*, 62, 273-283.

- [62] Dyadem Press (2003). *Guidelines for failure mode and effects analysis (FMEA), for automotive, aerospace, and general manufacturing industries*. CRC Press.
- [63] Ecer, F. (2022). Multi-criteria decision making for green supplier selection using interval type-2 fuzzy AHP: a case study of a home appliance manufacturer. *Operational Research*, 22(1), 199-233.
- [64] Ecer, F., & Pamucar, D. (2020). Sustainable supplier selection: A novel integrated fuzzy best worst method (F-BWM) and fuzzy CoCoSo with Bonferroni (CoCoSo'B) multi-criteria model. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121981.
- [65] Eftekhary, M., Gholami, P., Safari, S., & Shojaei, M. (2012). Ranking normalization methods for improving the accuracy of SVM algorithm by DEA method. *Modern applied science*, 6(10), 26-36.
- [66] Emovon, I., & Oghenyerovwho, O. S. (2020). Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review. *Results in Materials*, 7, 100115.
- [67] Ezugwu, A. E., Shukla, A. K., Nath, R., Akinyelu, A. A., Agushaka, J. O., Chiroma, H., & Muhuri, P. K. (2021). Metaheuristics: a comprehensive overview and classification along with bibliometric analysis. *Artificial Intelligence Review*, 54, 4237-4316.
- [68] Foroozesh, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Meysam Mousavi, S. (2018). Sustainable-supplier selection for manufacturing services: a failure mode and effects analysis model based on interval-valued fuzzy group decision-making. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(9), 3609-3629.
- [69] Galankashi, M. R., Helmi, S. A., & Hashemzahi, P. (2016). Supplier selection in automobile industry: A mixed balanced scorecard–fuzzy AHP approach. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 93-100.
- [70] Gandomi, A. H., Yang, X. S., Talatahari, S., & Alavi, A. H. (2013). Metaheuristic algorithms in modeling and optimization. *Metaheuristic applications in structures and infrastructures*, 1.
- [71] Gao, P., & Gao, Y. (2019). Quadrilateral interval type-2 fuzzy regression analysis for data outlier detection. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 1-9.
- [72] Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2010). *Handbook of metaheuristics* (Vol. 2, p. 9). New York: Springer.
- [73] Ghorabae, M. K., Amiri, M., Sadaghiani, J. S., & Zavadskas, E. K. (2015). Multi-criteria project selection using an extended VIKOR method with interval type-2 fuzzy sets. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 14(05), 993-1016.
- [74] Ghouschi, S. J., Yousefi, S., & Khazaeili, M. (2019). An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures. *Applied Soft Computing*, 81, 105505.
- [75] Godina, R., Silva, B. G. R., & Espadinha-Cruz, P. (2021). A DMAIC Integrated Fuzzy FMEA Model: A Case Study in the Automotive Industry. *Applied Sciences*, 11(8), 3726.
- [76] Gomes, L. F. (1989). Multicriteria ranking of urban transportation system alternatives. *Journal of Advanced Transportation*, 23(1), 43-52.
- [77] Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 1-29.

- [78] Grabisch, M., Marichal, J. L., Mesiar, R., & Pap, E. (2009). *Aggregation functions* (No. 127). Cambridge University Press.
- [79] Gul, M. (2018). Application of Pythagorean fuzzy AHP and VIKOR methods in occupational health and safety risk assessment: the case of a gun and rifle barrel external surface oxidation and colouring unit. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 26(4), 705-718.
- [80] Gupta, S., Soni, U., & Kumar, G. (2019). Green supplier selection using multi-criterion decision making under fuzzy environment: A case study in automotive industry. *Computers & Industrial Engineering*, 136, 663-680.
- [81] Hansen, P., Mladenović, N., Brimberg, J., & Pérez, J. A. M. (2019). *Variable neighborhood search* (pp. 57-97). Springer International Publishing.
- [82] Hanss, M. (2005). *Applied fuzzy arithmetic*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [83] Harifi, S., Mohammadzadeh, J., Khalilian, M., & Ebrahimnejad, S. (2021). Giza Pyramids Construction: an ancient-inspired metaheuristic algorithm for optimization. *Evolutionary Intelligence*, 14, 1743-1761.
- [84] Hashemkhani Zolfani, S., Yazdani, M., Kazimieras Zavadskas, E., & Hasheminasab, H. (2020). prospective madm and sensitivity analysis of the experts based on Causal layered analysis (Cla). *Information management*, 23(3), 4-21.
- [85] Hassan, A., Purnomo, M. R. A., & Anugerah, A. R. (2019). Fuzzy-analytical-hierarchy process in failure mode and effect analysis (FMEA) to identify process failure in the warehouse of a cement industry. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 18(2), 378-388.
- [86] Heidarzade, A., Mahdavi, I., & Mahdavi-Amiri, N. (2016). Supplier selection using a clustering method based on a new distance for interval type-2 fuzzy sets: A case study. *Applied Soft Computing*, 38, 213-231.
- [87] Hinloopen, E., & Nijkamp, P. (1986). Regime-methods voor ordinal multicriteria-analyses. *Kwantitatieve Methoden*, 7(22), 61-78.
- [88] Holland John, H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. *Ann Arbor: University of Michigan Press*.
- [89] Hu, J., Chen, P., & Yang, Y. (2019). An interval type-2 fuzzy similarity-based MABAC approach for patient-centered care. *Mathematics*, 7(2), 140.
- [90] Hu, J., Zhang, Y., Chen, X., & Liu, Y. (2013). Multi-criteria decision making method based on possibility degree of interval type-2 fuzzy number. *Knowledge-Based Systems*, 43, 21-29.
- [91] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple attribute decision making* (pp. 58-191). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [92] IATF16949:2016 (2017) *Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations*, 1st edition, International Automotive Task Force.
- [93] ICAO – International Civil Aviation Organization. (2013). *Safety management manual (SMM)*. International Civil Aviation Organization.
- [94] Ilbahar, E., Kahraman, C., & Cebi, S. (2022). Risk assessment of renewable energy investments: A modified failure mode and effect analysis based on prospect theory and intuitionistic fuzzy AHP. *Energy*, 239, 121907.

- [95] Jain, V., Sangaiah, A. K., Sakhuja, S., Thoduka, N., & Aggarwal, R. (2018). Supplier selection using fuzzy AHP and TOPSIS: a case study in the Indian automotive industry. *Neural computing and applications*, 29(7), 555-564.
- [96] Jiang, P., Hu, Y. C., Yen, G. F., & Tsao, S. J. (2018). Green supplier selection for sustainable development of the automotive industry using grey decision-making. *Sustainable Development*, 26(6), 890-903.
- [97] Jianzhong, S., Shaohua, L., Yong, Y., & Rong, L. (2019). An improved general type-2 fuzzy sets type reduction and its application in general type-2 fuzzy controller design. *Soft Computing*, 23(24), 13513-13530.
- [98] Jokić, Ž., Božanić, D., & Pamučar, D. (2021). Selection of fire position of mortar units using LBWA and Fuzzy MABAC model. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 4(1), 115-135.
- [99] Kahraman, C., & Sarı, İ. U. (2012). Multicriteria environmental risk evaluation using type II fuzzy sets. In *International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems* (pp. 449-457). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [100] Kahraman, C., Onar, S. C., & Oztaysi, B. (2015). Fuzzy multicriteria decision-making: a literature review. *International journal of computational intelligence systems*, 8(4), 637-666.
- [101] Kahraman, C., Öztaysi, B., Sarı, İ. U., & Turanoğlu, E. (2014). Fuzzy analytic hierarchy process with interval type-2 fuzzy sets. *Knowledge-Based Systems*, 59, 48-57.
- [102] Kahraman, C., Uçal Sarı, I., & Turanoğlu, E. (2012). Fuzzy analytic hierarchy process with Type-2 fuzzy sets. In *Uncertainty Modeling in Knowledge Engineering and Decision Making* (pp. 201-206).
- [103] Karimi, H., Sadeghi-Dastaki, M., & Javan, M. (2020). A fully fuzzy best–worst multi attribute decision making method with triangular fuzzy number: A case study of maintenance assessment in the hospitals. *Applied Soft Computing*, 86, 105882.
- [104] Karnik, N. N., & Mendel, J. M. (2001). Operations on type-2 fuzzy sets. *Fuzzy sets and systems*, 122(2), 327-348.
- [105] Kaur, S., & Bharti, G. (2012). Two inputs two output fuzzy controller system design using MATLAB. *International Journal of Advances in Engineering, Science and Technology (IJAEST)*, 2(3), 209-218.
- [106] Kefer, P., Milanovic, D. D., Misita, M., & Zunjic, A. (2016). Fuzzy multicriteria ABC supplier classification in global supply chain. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016.
- [107] Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1976). Decision analysis with multiple conflicting objectives. *Wiley & Sons, New York*.
- [108] Khairuddin, S. H., Hasan, M. H., Hashmani, M. A., & Azam, M. H. (2021). Generating clustering-based interval fuzzy type-2 triangular and trapezoidal membership functions: a structured literature review. *Symmetry*, 13(2), 239.
- [109] Kilic, M., & Kaya, I. (2015). Investment project evaluation by a decision making methodology based on type-2 fuzzy sets. *Applied Soft Computing*, 27, 399-410.
- [110] Kiracı, K., & Akan, E. (2020). Aircraft selection by applying AHP and TOPSIS in interval type-2 fuzzy sets. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101924.

- [111] Klir, G., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic* (Vol. 4). New Jersey: Prentice hall.
- [112] Komatina, N., Đapan, M., Ristić, I., & Aleksić, A. (2021). Fulfilling External Stakeholders' Demands—Enhancement Workplace Safety Using Fuzzy MCDM. *Sustainability*, 13(5), 2892.
- [113] Komatina, N., Ljepava, N., Tadić, D. (2018). The analysis procedure and application of Multi-Criteria Decision-Making methods in selection of industry equipment. In *3rd International Conference on Quality of Life*, 157-164, Kopaonik, Republic of Serbia.
- [114] Komatina, N., Tadić, D., Aleksić, A., & Banduka, N. (2022a). The integrated PFMEA approach with interval type-2 fuzzy sets and FBWM: A case study in the automotive industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 236(6), 1201-1212.
- [115] Komatina, N., Tadić, D., Aleksić, A., & Jovanović, A. D. (2022b). The assessment and selection of suppliers using AHP and MABAC with type-2 fuzzy numbers in automotive industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 1748006X221095359.
- [116] Komatina, N., Tadić, D., Đurić, G., & Aleksić, A. (2023). Determination of manufacturing process failures priority under type 2 fuzzy environment: Application of genetic algorithm and Variable neighborhood search. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 09544089231160510.
- [117] Kubler, S., Robert, J., Derigent, W., Voisin, A., & Le Traon, Y. (2016). A state-of-the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications. *Expert Systems with Applications*, 65, 398-422.
- [118] Kudláč, Š., Štefancová, V., & Majerčák, J. (2017). Using the Saaty Method and the FMEA Method for Evaluation of Constraints in Logistics Chain. *Procedia Engineering*, 187, 749-755.
- [119] Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596-609.
- [120] Kuo, M. S., & Liang, G. S. (2012). A soft computing method of performance evaluation with MCDM based on interval-valued fuzzy numbers. *Applied Soft Computing*, 12(1), 476-485.
- [121] Lahdelma, R., Hokkanen, J., & Salminen, P. (1998). SMAA-stochastic multiobjective acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 106(1), 137-143.
- [122] Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landín, G., Heras-Saizarbitoria, I., & Boiral, O. (2021). How does IATF 16949 add value to ISO 9001? An empirical study. *Total Quality Management & Business Excellence*, 32(11-12), 1341-1358.
- [123] Lee, L. W., & Chen, S. M. (2008). Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the extension of TOPSIS method and interval type-2 fuzzy sets. In *2008 international conference on machine learning and cybernetics* (Vol. 6, pp. 3260-3265). IEEE.
- [124] Li, C., Zhang, G., Yi, J., & Wang, M. (2013). Uncertainty degree and modeling of interval type-2 fuzzy sets: definition, method and application. *Computers & Mathematics with Applications*, 66(10), 1822-1835.

- [125] Li, H., Diaz, H., & Soares, C. G. (2021). A developed failure mode and effect analysis for floating offshore wind turbine support structures. *Renewable Energy*, *164*, 133-145.
- [126] Li, H., Teixeira, A. P., & Soares, C. G. (2020). A two-stage Failure Mode and Effect Analysis of offshore wind turbines. *Renewable Energy*, *162*, 1438-1461.
- [127] Li, S., & Zeng, W. (2016). Risk analysis for the supplier selection problem using failure modes and effects analysis (FMEA). *Journal of Intelligent Manufacturing*, *27*(6), 1309-1321.
- [128] Liang, W., Zhao, G., Wu, H., & Dai, B. (2019). Risk assessment of rockburst via an extended MABAC method under fuzzy environment. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *83*, 533-544.
- [129] Lipol, L. S., & Haq, J. (2011). Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations. *International Journal of Basic & Applied Sciences*, *11*(5), 74-82.
- [130] Liu, F., & Mendel, J. M. (2008). Encoding words into interval type-2 fuzzy sets using an interval approach. *IEEE transactions on fuzzy systems*, *16*(6), 1503-1521.
- [131] Liu, H. C. (2016). FMEA using uncertainty theories and MCDM methods. In *FMEA using uncertainty theories and MCDM methods* (pp. 13-27). Springer, Singapore.
- [132] Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert systems with applications*, *40*(2), 828-838.
- [133] Liu, H. C., Liu, L., Bian, Q. H., Lin, Q. L., Dong, N., & Xu, P. C. (2011). Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. *Expert Systems with Applications*, *38*(4), 4403-4415.
- [134] Liu, H. C., Liu, L., Liu, N., & Mao, L. X. (2012). Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, *39*(17), 12926-12934.
- [135] Liu, H. C., You, J. X., & Duan, C. Y. (2019). An integrated approach for failure mode and effect analysis under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *International Journal of Production Economics*, *207*, 163-172.
- [136] Liu, H. C., You, J. X., Ding, X. F., & Su, Q. (2015). Improving risk evaluation in FMEA with a hybrid multiple criteria decision making method. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *30*(7), 763-782.
- [137] Liu, K., Liu, Y., & Qin, J. (2018). An integrated ANP-VIKOR methodology for sustainable supplier selection with interval type-2 fuzzy sets. *Granular Computing*, *3*(3), 193-208.
- [138] Lolli, F., Ishizaka, A., Gamberini, R., Rimini, B., & Messori, M. (2015). FlowSort-GDSS—A novel group multi-criteria decision support system for sorting problems with application to FMEA. *Expert Systems with Applications*, *42*(17-18), 6342-6349.
- [139] Lootsma, F. A. (1990). The French and the American school in multi-criteria decision analysis. *RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle*, *24*(3), 263-285.
- [140] Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.
- [141] Manello, A., & Calabrese, G. (2019). The influence of reputation on supplier selection: An empirical study of the European automotive industry. *Journal of Purchasing and Supply Management*, *25*(1), 69-77.
- [142] Martel, J. M., & Matarazzo, B. (2016). Other outranking approaches. In *Multiple Criteria Decision Analysis* (pp. 221-282). Springer, New York, NY.

- [143] Mathew, T. V. (2012). Genetic algorithm. *Report submitted at IIT Bombay*, 53.
- [144] Mendel, J. M. (2012). Plotting 2-1/2 D figures for general type-2 fuzzy sets by hand or by powerpoint. In *2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems* (pp. 1-8). IEEE.
- [145] Mendel, J. M. (2017). Uncertain rule-based fuzzy systems. *Introduction and new directions*, 684.
- [146] Mendel, J. M., & Wu, H. (2006). Type-2 fuzzistics for symmetric interval type-2 fuzzy sets: Part 1, forward problems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(6), 781-792.
- [147] Mendel, J. M., John, R. I., & Liu, F. (2006). Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 14(6), 808-821.
- [148] Merigó, J. M. (2011). Fuzzy Multi-Person Decision Making with Fuzzy Probabilistic Aggregation Operators. *International Journal of Fuzzy Systems*, 13(3), 163-174.
- [149] Milanovic, M., Misita, M., & Komatina, N. (2020). Determination of the optimal production plan by using fuzzy AHP and fuzzy linear programming. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(4), 4315-4325.
- [150] Miner Jr, F. C. (1984). Group versus individual decision making: An investigation of performance measures, decision strategies, and process losses/gains. *Organizational Behavior and Human Performance*, 33(1), 112-124.
- [151] Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. MIT press.
- [152] Mladenović, N. (1995). A variable neighborhood algorithm-a new metaheuristic for combinatorial optimization. In *papers presented at Optimization Days* (Vol. 12).
- [153] Mladenović, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, 24(11), 1097-1100.
- [154] Mocq, J., St-Hilaire, A., & Cunjak, R. A. (2013). Assessment of Atlantic salmon (*Salmo salar*) habitat quality and its uncertainty using a multiple-expert fuzzy model applied to the Romaine River (Canada). *Ecological modelling*, 265, 14-25.
- [155] Mohamadinejad, A., Kakaei, P., Nikdel, T., Khalil Tahmasobi, M., Tamoradi Mongenan, N., & Janizadeh, R. (2019). Risk identification and risk assessment using failure mode and effect analysis in a textile industry. *Caspian Journal of Health Research*, 4(3), 60-65.
- [156] Mohammadi, A., & Tavakolan, M. (2013). Construction project risk assessment using combined fuzzy and FMEA. In *2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)* (pp. 232-237). IEEE.
- [157] Mohammed, A., Harris, I., & Govindan, K. (2019). A hybrid MCDM-FMOO approach for sustainable supplier selection and order allocation. *International Journal of Production Economics*, 217, 171-184.
- [158] Moslem, S., Gul, M., Farooq, D., Celik, E., Ghorbanzadeh, O., & Blaschke, T. (2020). An integrated approach of best-worst method (bwm) and triangular fuzzy sets for evaluating driver behavior factors related to road safety. *Mathematics*, 8(3), 414.
- [159] Mutlu, N. G., & Altuntas, S. (2019). Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods. *International journal of industrial ergonomics*, 72, 222-240.

- [160] Nehi, H. M., & Keikha, A. (2016). TOPSIS and Choquet integral hybrid technique for solving MAGDM problems with interval type-2 fuzzy numbers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30(3), 1301-1310.
- [161] Nestić, S., Đorđević, A., Puškarić, H., Đorđević, M. Z., Tadić, D., & Stefanović, M. (2015). The evaluation and improvement of process quality by using the fuzzy sets theory and genetic algorithm approach. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 29(5), 2017-2028.
- [162] Nggada, S. H. (2012). Software failure analysis at architecture level using FMEA. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 6(1), 61-74.
- [163] Nie, M., & Tan, W. W. (2008). Towards an efficient type-reduction method for interval type-2 fuzzy logic systems. In *2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence)* (pp. 1425-1432). IEEE.
- [164] Nijkamp, P., Rietveld, P., & Voogd, H. (2013). *Multicriteria evaluation in physical planning*. Elsevier.
- [165] Odu, G. O., & Charles-Owaba, O. E. (2013). Review of multi-criteria optimization methods—theory and applications. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 3(10), 1-14.
- [166] Oh, S., Ryu, K., Moon, I., Cho, H., & Jung, M. (2010). Collaborative fractal-based supply chain management based on a trust model for the automotive industry. *Flexible services and manufacturing journal*, 22(3), 183-213.
- [167] Opricović, S., & Tzeng, G. H. (2002). Multicriteria planning of post-earthquake sustainable reconstruction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 17(3), 211-220.
- [168] Özilgen, S., & Özilgen, M. (2016). General template for the FMEA applications in primary food processing. In *Measurement, Modeling and Automation in Advanced Food Processing* (pp. 29-69). Springer, Cham.
- [169] Oztaysi, B. (2015). A Group Decision Making Approach Using Interval Type-2 Fuzzy AHP for Enterprise Information Systems Project Selection. *Journal of Multiple-Valued Logic & Soft Computing*, 24(5).
- [170] Pamučar, D., & Ćirović, G. (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC). *Expert systems with applications*, 42(6), 3016-3028.
- [171] Pamučar, D., Stević, Ž., & Zavadskas, E. K. (2018). Integration of interval rough AHP and interval rough MABAC methods for evaluating university web pages. *Applied soft computing*, 67, 141-163.
- [172] Pannu, A. (2015). Artificial intelligence and its application in different areas. *Artificial Intelligence*, 4(10), 79-84.
- [173] Park, G. Y., Kim, D. H., & Lee, D. Y. (2014). Software FMEA analysis for safety-related application software. *Annals of Nuclear Energy*, 70, 96-102.
- [174] Pedrycz, W., & Vukovich, G. (2002). Feature analysis through information granulation and fuzzy sets. *Pattern Recognition*, 35(4), 825-834.
- [175] Pillay, A., & Wang, J. (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(1), 69-85.

- [176] Pomerol, J. C., & Barba-Romero, S. (2000). *Multicriterion decision in management: principles and practice* (Vol. 25). Springer Science & Business Media.
- [177] Puzović, S., Vasović, J. V., Radojičić, M., & Paunović, V. (2019). An integrated MCDM approach to PLM software selection. *Acta Polytechnica Hungarica*, 16(4), 45-65.
- [178] Qin, J., Liu, X., & Pedrycz, W. (2015). An extended VIKOR method based on prospect theory for multiple attribute decision making under interval type-2 fuzzy environment. *Knowledge-Based Systems*, 86, 116-130.
- [179] Rah, J. E., Manger, R. P., Yock, A. D., & Kim, G. Y. (2016). A comparison of two prospective risk analysis methods: Traditional FMEA and a modified healthcare FMEA. *Medical physics*, 43(12), 6347-6353.
- [180] Rebello, S., & Goyal, N. K. (2010). Software system reliability and safety assessment: an extended FMEA approach. *International journal of Reliability and Safety*, 4(4), 366-380.
- [181] Renjith, V. R., Kumar, P. H., & Madhavan, D. (2018). Fuzzy FMECA (failure mode effect and criticality analysis) of LNG storage facility. *Journal of loss prevention in the process industries*, 56, 537-547.
- [182] Rezaee, M. J., Yousefi, S., Eshkevari, M., Valipour, M., & Saberi, M. (2020). Risk analysis of health, safety and environment in chemical industry integrating linguistic FMEA, fuzzy inference system and fuzzy DEA. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(1), 201-218.
- [183] Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
- [184] Rezaei, J., Wang, J., & Tavasszy, L. (2015). Linking supplier development to supplier segmentation using Best Worst Method. *Expert Systems with Applications*, 42(23), 9152-9164.
- [185] Roshanaei, V., Naderi, B., Jolai, F., & Khalili, M. (2009). A variable neighborhood search for job shop scheduling with set-up times to minimize makespan. *Future Generation Computer Systems*, 25(6), 654-661.
- [186] Roubens, M. (1982). Preference relations on actions and criteria in multicriteria decision making. *European Journal of Operational Research*, 10(1), 51-55.
- [187] Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*, 2(8), 57-75.
- [188] Saaty, T. (1980). The analytic hierarchy process (AHP) for decision making. In *Kobe, Japan* (pp. 1-69).
- [189] Saaty, T. L. (1980). The analytical hierarchy process, planning, priority. *Resource allocation*. RWS publications, USA.
- [190] Saaty, T. L. (1996). *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process* (Vol. 4922, No. 2). Pittsburgh: RWS publications.
- [191] Saaty, T. L. (2013). The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: The AHP/ANP approach. *Operations Research*, 61(5), 1101-1118.
- [192] Sabaei, D., Erkoyuncu, J., & Roy, R. (2015). A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery. *Procedia CIRP*, 37, 30-35.

- [193] Sadi-Nezhad, S., & Damghani, K. K. (2010). Application of a fuzzy TOPSIS method base on modified preference ratio and fuzzy distance measurement in assessment of traffic police centers performance. *Applied soft computing*, 10(4), 1028-1039.
- [194] Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J. E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., ... & Doré, T. (2008). Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 163-174.
- [195] Safari, H., Faraji, Z., & Majidian, S. (2016). Identifying and evaluating enterprise architecture risks using FMEA and fuzzy VIKOR. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(2), 475-486.
- [196] Salabun, W., & Urbaniak, K. (2020). A new coefficient of rankings similarity in decision-making problems. In *International Conference on Computational Science* (pp. 632-645). Springer, Cham.
- [197] Schuller, B. W., Burns, A., Ceilley, E. A., King, A., LeTourneau, J., Markovic, A., ... & Albert, J. M. (2017). Failure mode and effects analysis: A community practice perspective. *Journal of applied clinical medical physics*, 18(6), 258-267.
- [198] Scipioni, A., Saccarola, G., Centazzo, A., & Arena, F. (2002). FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food company. *Food control*, 13(8), 495-501.
- [199] Shafiee, M., & Dinmohammadi, F. (2014). An FMEA-based risk assessment approach for wind turbine systems: a comparative study of onshore and offshore. *Energies*, 7(2), 619-642.
- [200] Shahin, A. (2004). Integration of FMEA and the Kano model: An exploratory examination. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 21(7), 731-746.
- [201] Sharaf, I. M. (2020). An interval type-2 fuzzy TOPSIS using the extended vertex method for MAGDM. *SN Applied Sciences*, 2(1), 1-15.
- [202] Soner, O., Celik, E., & Akyuz, E. (2017). Application of AHP and VIKOR methods under interval type 2 fuzzy environment in maritime transportation. *Ocean Engineering*, 129, 107-116.
- [203] Soner, O., Celik, E., & Akyuz, E. (2022). A fuzzy best–worst method (BWM) to assess the potential environmental impacts of the process of ship recycling. *Maritime Policy & Management*, 49(3), 396-409.
- [204] Sörensen, K., & Glover, F. (2013). Metaheuristics. *Encyclopedia of operations research and management science*, 62, 960-970.
- [205] Sousa, M., Almeida, M. F., & Calili, R. (2021). Multiple Criteria Decision Making for the Achievement of the UN Sustainable Development Goals: A Systematic Literature Review and a Research Agenda. *Sustainability*, 13(8), 4129.
- [206] Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Quality Press.
- [207] Stojčić, M., Zavadskas, E. K., Pamučar, D., Stević, Ž., & Mardani, A. (2019). Application of MCDM methods in sustainability engineering: A literature review 2008–2018. *Symmetry*, 11(3), 350.

- [208] Suraraksa, J., & Shin, K. S. (2019). Comparative analysis of factors for supplier selection and monitoring: The case of the automotive industry in Thailand. *Sustainability*, 11(4), 981.
- [209] Syan, C. S., & Ramsoobag, G. (2019). Maintenance applications of multi-criteria optimization: a review. *Reliability Engineering & System Safety*, 190, 106520.
- [210] Tadić, D., Savović, I., Misita, M., Arsovski, S., & Milanović, D. D. (2014). Development of a fuzzy logic-based inherent safety index for food industries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 228(1), 3-13.
- [211] Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. John Wiley & Sons.
- [212] Temur, G. T., Kaya, T., & Kahraman, C. (2014). Facility location selection in reverse logistics using a type-2 fuzzy decision aid method. In *Supply chain management under fuzziness* (pp. 591-606). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [213] Trafialek, J., & Kolanowski, W. (2014). Application of failure mode and effect analysis (FMEA) for audit of HACCP system. *Food Control*, 44, 35-44.
- [214] Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria decision making methods. In *Multi-criteria decision making methods: A comparative study* (pp. 5-21). Springer, Boston, MA.
- [215] Triantaphyllou, E., Shu, B., Sanchez, S. N., & Ray, T. (1998). Multi-criteria decision making: an operations research approach. *Encyclopedia of electrical and electronics engineering*, 15(1998), 175-186.
- [216] Uçal Sarý, I., Öztayşı, B., & Kahraman, C. (2013). Fuzzy analytic hierarchy process using type-2 fuzzy sets: An application to warehouse location selection. *Multicriteria decision aid and artificial intelligence: Links, theory and applications*, 285-308.
- [217] United States Military Forces (1949). Procedure for performing a failure mode effect and criticality analysis. *United States military procedure MIL-P-1629*.
- [218] Ur Rehman, Z., Hussain, O. K., & Hussain, F. K. (2012). IaaS cloud selection using MCDM methods. In *2012 IEEE Ninth international conference on e-business engineering* (pp. 246-251). IEEE.
- [219] Valiris, G., Chytas, P., & Glykas, M. (2005). Making decisions using the balanced scorecard and the simple multi-attribute rating technique. *Performance Measurement and Metrics*, 6(3), 159-171.
- [220] Vazdani, S., Sabzghabaei, G., Dashti, S., Cheraghi, M., Alizadeh, R., & Hemmati, A. (2017). FMEA techniques used in environmental risk assessment. *Environment & Ecosystem Science (EES)*, 1(2), 16-18.
- [221] Vasović, J., Radojčić, M., Vasović, S., & Nešić, Z. (2017). Multi-criteria Selection of the Computer Configuration for Engineering Design. *International Arab Journal of Information Technology (IAJIT)*, 14(5).
- [222] VDA – *Verband der Automobilindustrie*, Званични сајт „Немачке асоцијације за аутомобилску индустрију”, интернет адреса: <https://www.vda.de/en/association/members/manufacturer-group-I.html>, датум приступа: 11. 02. 2020.
- [223] Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2263-2278.

- [224] Wang, J. Q., Yu, S. M., Wang, J., Chen, Q. H., Zhang, H. Y., & Chen, X. H. (2015). An interval type-2 fuzzy number based approach for multi-criteria group decision-making problems. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 23(04), 565-588.
- [225] Wang, K. (2001). Computational intelligence in agile manufacturing engineering. *Agile Manufacturing The 21st Century Competitive Strategy*, Oxford, UK: Elsevier Science Ltd, 297-315.
- [226] Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert systems with applications*, 36(2), 1195-1207.
- [227] Wright, S., & Nocedal, J. (1999). Numerical optimization. *Springer Science*, 35(67-68), 7.
- [228] Wu, D. (2010). A brief Tutorial on Interval type-2 fuzzy sets and systems. *Fuzzy sets and systems*.
- [229] Wu, Q., Zhou, L., Chen, Y., & Chen, H. (2019). An integrated approach to green supplier selection based on the interval type-2 fuzzy best-worst and extended VIKOR methods. *Information Sciences*, 502, 394-417.
- [230] Xu, Z. S. (2001). A ranking arithmetic for fuzzy mutual complementary judgment matrices. *Journal of Systems Engineering*, 16(4), 311-314.
- [231] Xue, Y. X., You, J. X., Lai, X. D., & Liu, H. C. (2016). An interval-valued intuitionistic fuzzy MABAC approach for material selection with incomplete weight information. *Applied Soft Computing*, 38, 703-713.
- [232] Yager, R. R. (1993). Families of OWA operators. *Fuzzy sets and systems*, 59(2), 125-148.
- [233] Yazdani, M., Zavadskas, E. K., Ignatius, J., & Abad, M. D. (2016). Sensitivity analysis in MADM methods: application of material selection. *Engineering Economics*, 27(4), 382-391.
- [234] Yazdi, M. (2019). Improving failure mode and effect analysis (FMEA) with consideration of uncertainty handling as an interactive approach. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13(2), 441-458.
- [235] Yazici, I., & Kahraman, C. (2015). VIKOR method using interval type two fuzzy sets. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 29(1), 411-421.
- [236] Yeh, C. H. (2002). A problem-based selection of multi-attribute decision-making methods. *International Transactions in Operational Research*, 9(2), 169-181.
- [237] Yu, S. M., Wang, J., & Wang, J. Q. (2017). An interval type-2 fuzzy likelihood-based MABAC approach and its application in selecting hotels on a tourism website. *International Journal of Fuzzy Systems*, 19(1), 47-61.
- [238] Yuan, X., Li, H., & Song, J. (2013). Interval-valued level cut sets, decomposition theorems and resentation theorems on Interval-valued Fuzzy Sets. *Fuzzy Syst Math*, 37, 3112-3125.
- [239] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- [240] Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, (1), 28-44.

- [241] Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3), 199-249.
- [242] Zadeh, L. A. (1999). Fuzzy logic = computing with words. In *Computing with Words in Information/Intelligent Systems 1* (pp. 3-23). Physica, Heidelberg.
- [243] Zadeh, L. A. (2015). Fuzzy logic—a personal perspective. *Fuzzy sets and systems*, 281, 4-20.
- [244] Zammori, F., & Gabbrielli, R. (2012). ANP/RPN: A multi criteria evaluation of the risk priority number. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(1), 85-104.
- [245] Zamri, N., & Abdullah, L. (2014, June). Flood control project selection using an interval type-2 entropy weight with interval type-2 fuzzy TOPSIS. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1602, No. 1, pp. 62-68). American Institute of Physics.
- [246] Zandi, P., Rahmani, M., Khanian, M., & Mosavi, A. (2020). Agricultural risk management using fuzzy TOPSIS analytical hierarchy process (AHP) and failure mode and effects analysis (FMEA). *Agriculture*, 10(11), 504.
- [247] Zavadskas, E. K., & Kaklauskas, A. (1996). Pastatų sistemotechninis įvertinimas. *Vilnius: Technika*, 146.
- [248] Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and economic development of economy*, 16(2), 159-172.
- [249] Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2011). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview. *Technological and economic development of economy*, 17(2), 397-427.
- [250] Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A., Turskis, Z., & Tamošaitienė, J. (2009). Multi-attribute decision-making model by applying grey numbers. *Informatika*, 20(2), 305-320.
- [251] Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and economic development of economy*, 20(1), 165-179.
- [252] Zhang, H., Zhang, W., & Mei, C. (2009). Entropy of interval-valued fuzzy sets based on distance and its relationship with similarity measure. *Knowledge-Based Systems*, 22(6), 449-454.
- [253] Zhang, Z., Zhao, X., Qin, Y., Si, H., & Zhou, L. (2021). Interval type-2 fuzzy TOPSIS approach with utility theory for subway station operational risk evaluation. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-15.
- [254] Zhong, L., Yang, X., & Wu, Z. (2017). An New Framework for MADM with Linguistic Information Under an IT2 FSs Environment. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Management Science and Engineering Management* (pp. 607-618). Springer, Singapore.
- [255] Zhou, Q., & Thai, V. V. (2016). Fuzzy and grey theories in failure mode and effect analysis for tanker equipment failure prediction. *Safety science*, 83, 74-79.
- [256] Zhou, S. M., John, R. I., Chiclana, F., & Garibaldi, J. M. (2010). On aggregating uncertain information by type-2 OWA operators for soft decision making. *International Journal of Intelligent Systems*, 25(6), 540-558.

- [257] Zhu, G. N., Ma, J., & Hu, J. (2022). A fuzzy rough number extended AHP and VIKOR for failure mode and effects analysis under uncertainty. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101454.
- [258] Zimmermann, H. J. (2011). *Fuzzy set theory—and its applications*. Springer Science & Business Media.

ПРИЛОГ

У овом Прилогу су дати улазни подаци коришћени у студији случаја приказаној у потпоглављу 5.5. Претходно агрегирани подаци, односно вредности фактора ризика, узимајући у обзир њихове тежине, као и трошкови застоја који настају услед реализације идентификованих начина отказа (\tilde{c}_{2t}), означени су као y_t . Трошкови одржавања (c_{1t}) коришћени су као ограничење, односно као услов заустављања претраге. У табелама од П1 до П5 приказани су наведени подаци.

Узорак 1:

Функција циља:

$$\max_{j=1,\dots,J} (y_t)$$

Ограничење:

$$\sum_{j=1,\dots,J} c_j \leq 350$$

Табела П1 – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 1, $T = 25$)

Начин отказа	y_t	c_{1t}
$t = 1$	6,322	30
$t = 2$	9,025	5
$t = 3$	12,859	5
$t = 4$	11,144	25
$t = 5$	14,723	5
$t = 6$	8,034	25
$t = 7$	11,183	40
$t = 8$	9,335	20
$t = 9$	15,31	10
$t = 10$	9,4	0
$t = 11$	14,616	5
$t = 12$	14,616	5
$t = 13$	12,738	20
$t = 14$	15,943	45
$t = 15$	23,828	30
$t = 16$	9,196	40
$t = 17$	8,052	100
$t = 18$	21,029	40
$t = 19$	11,801	60
$t = 20$	9,219	70
$t = 21$	7,586	40
$t = 22$	15,423	30
$t = 23$	35,053	30
$t = 24$	35,053	30
$t = 25$	9,668	40

Узорак 2:

Функција циља:

$$\max_{j=1,\dots,J} (y_t)$$

Ограничење:

$$\sum_{j=1,\dots,J} c_j \leq 1800$$

Табела П2 – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 2, $T = 50$)

Начин отказа	y_t	c_{1t}
$t = 1$	4,857	250
$t = 2$	4,857	250
$t = 3$	3,446	250
$t = 4$	6,474	30
$t = 5$	11,127	20
$t = 6$	5,361	30
$t = 7$	11,572	10
$t = 8$	7,344	25
$t = 9$	6,414	50
$t = 10$	7,354	20
$t = 11$	16,057	100
$t = 12$	15,813	120
$t = 13$	24,625	70
$t = 14$	28,159	0
$t = 15$	27,703	10
$t = 16$	6,065	30
$t = 17$	6,435	40
$t = 18$	7,308	40
$t = 19$	30,059	0
$t = 20$	8,902	120
$t = 21$	13,823	120
$t = 22$	7,308	40
$t = 23$	6,435	40
$t = 24$	7,317	35
$t = 25$	9,791	70
$t = 26$	21,558	100
$t = 27$	9,53	120
$t = 28$	15,813	120
$t = 29$	7,308	40
$t = 30$	6,449	30
$t = 31$	7,326	30
$t = 32$	37,06	10
$t = 33$	12,856	20
$t = 34$	20,2	30
$t = 35$	7,308	40
$t = 36$	6,449	30
$t = 37$	7,281	50
$t = 38$	15,813	120
$t = 39$	33,548	150
$t = 40$	34,788	120
$t = 41$	24,781	150
$t = 42$	24,781	150
$t = 43$	21,957	200

Табела П2 (наставак) – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 2, $T = 50$)

Начин отказа	y_t	c_{1t}
$t = 44$	21,957	200
$t = 45$	17,291	90
$t = 46$	16,057	100
$t = 47$	16,057	100
$t = 48$	7,308	40
$t = 49$	6,449	30
$t = 50$	7,308	40

Узорак 3:

Функција циља:

$$\max_{j=1,\dots,J} (y_t)$$

Ограничење:

$$\sum_{j=1,\dots,J} c_j \leq 500$$

Табела П3 – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 3, $T = 87$)

Начин отказа	y_t	c_{1t}
$t = 1$	6.146	0
$t = 2$	6.146	0
$t = 3$	18.505	0
$t = 4$	16.821	0
$t = 5$	22.040	0
$t = 6$	20.356	0
$t = 7$	20.356	0
$t = 8$	5.222	0
$t = 9$	5.222	0
$t = 10$	5.222	0
$t = 11$	6.785	0
$t = 12$	6.785	0
$t = 13$	10.178	0
$t = 14$	15.014	5
$t = 15$	10.297	10
$t = 16$	12.871	10
$t = 17$	15.335	10
$t = 18$	10.205	15
$t = 19$	18.965	20
$t = 20$	12.936	20
$t = 21$	15.335	10
$t = 22$	16.182	12
$t = 23$	16.182	12
$t = 24$	15.335	10
$t = 25$	15.335	10
$t = 26$	14.567	5
$t = 27$	9.187	25
$t = 28$	10.963	15
$t = 29$	16.182	12
$t = 30$	25.437	12

Табела ПЗ (наставак 1) – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 3, $T = 87$)

Начин отказа	Y_t	C_{1t}
$t = 31$	15,335	10
$t = 32$	14,423	8
$t = 33$	9,115	30
$t = 34$	8,695	25
$t = 35$	8,695	25
$t = 36$	8,695	25
$t = 37$	10,297	10
$t = 38$	10,297	10
$t = 39$	10,297	10
$t = 40$	10,297	10
$t = 41$	10,297	10
$t = 42$	10,297	10
$t = 43$	10,297	10
$t = 44$	10,297	10
$t = 45$	10,297	10
$t = 46$	15,335	10
$t = 47$	6,814	20
$t = 48$	7,827	10
$t = 49$	10,297	10
$t = 50$	8,777	20
$t = 51$	15,335	10
$t = 52$	10,297	10
$t = 53$	10,297	10
$t = 54$	10,297	10
$t = 55$	10,297	10
$t = 56$	10,297	10
$t = 57$	15,335	10
$t = 58$	10,297	10
$t = 59$	8,777	20
$t = 60$	6,814	20
$t = 61$	10,297	10
$t = 62$	10,297	10
$t = 63$	8,777	20
$t = 64$	10,297	10
$t = 65$	10,297	10
$t = 66$	10,297	10
$t = 67$	8,777	20
$t = 68$	8,777	20
$t = 69$	15,335	10
$t = 70$	10,297	10
$t = 71$	15,335	10
$t = 72$	14,567	5
$t = 73$	15,335	10
$t = 74$	10,297	10
$t = 75$	10,297	10
$t = 76$	10,297	10
$t = 77$	10,297	10
$t = 78$	10,297	10
$t = 79$	6,575	25
$t = 80$	8,777	20
$t = 81$	10,297	10
$t = 82$	6,723	25
$t = 83$	6,723	25
$t = 84$	30,793	0

Табела П3 (наставкак 2) – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 3, $T = 87$)

Начин отказа	y_t	c_{1t}
$t = 85$	12,287	15
$t = 86$	30,793	0
$t = 87$	12,287	15

Узорак 4:

Функција циља:

$$\max_{j=1,\dots,J} (y_t)$$

Ограничење:

$$\sum_{j=1,\dots,J} c_j \leq 500$$

Табела П4 – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 4, $T = 93$)

Начин отказа	y_t	c_{1t}
$t = 1$	28,55	5
$t = 2$	11,96	100
$t = 3$	95,58	80
$t = 4$	648,41	5
$t = 5$	87,10	50
$t = 6$	93,79	80
$t = 7$	49,07	80
$t = 8$	93,81	45
$t = 9$	8,91	5
$t = 10$	12,91	10
$t = 11$	16,13	90
$t = 12$	1801,96	5
$t = 13$	25,62	20
$t = 14$	173,93	30
$t = 15$	17,62	5
$t = 16$	12,14	5
$t = 17$	305,43	30
$t = 18$	326,38	15
$t = 19$	8,88	10
$t = 20$	10,96	12
$t = 21$	205,45	45
$t = 22$	877,27	5
$t = 23$	28,68	10
$t = 24$	17,20	20
$t = 25$	12,45	5
$t = 26$	10,59	5
$t = 27$	8,91	5
$t = 28$	16,46	5
$t = 29$	10,59	5
$t = 30$	903,60	5
$t = 31$	548,20	15
$t = 32$	230,46	40
$t = 33$	10,06	20

Табела П4 (наставак 1) – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 4, $T = 93$)

Начин отказа	Y_t	C_{1t}
$t = 34$	9,40	5
$t = 35$	9,30	10
$t = 36$	1525,05	5
$t = 37$	1218,84	5
$t = 38$	904,21	10
$t = 39$	12,99	5
$t = 40$	9,28	5
$t = 41$	877,27	5
$t = 42$	10,14	5
$t = 43$	12,99	5
$t = 44$	10,59	5
$t = 45$	8,34	5
$t = 46$	27,86	5
$t = 47$	15,74	95
$t = 48$	27,86	5
$t = 49$	457,93	10
$t = 50$	10,59	5
$t = 51$	1878,51	5
$t = 52$	12,99	5
$t = 53$	8,54	5
$t = 54$	877,27	5
$t = 55$	27,86	5
$t = 56$	12,14	5
$t = 57$	17,48	10
$t = 58$	10,79	10
$t = 59$	10,59	5
$t = 60$	27,86	5
$t = 61$	9,67	55
$t = 62$	437,00	15
$t = 63$	8,08	5
$t = 64$	13,83	15
$t = 65$	8,79	5
$t = 66$	12,99	5
$t = 67$	8,91	5
$t = 68$	18,37	5
$t = 69$	17,48	10
$t = 70$	579,25	15
$t = 71$	8,91	5
$t = 72$	27,86	5
$t = 73$	16,32	10
$t = 74$	15,97	5
$t = 75$	8,28	5
$t = 76$	1633,10	5
$t = 77$	9,09	5
$t = 78$	10,95	45
$t = 79$	122,17	55
$t = 80$	279,28	15
$t = 81$	8,35	5
$t = 82$	810,46	5
$t = 83$	25,26	5
$t = 84$	15,97	5
$t = 85$	17,46	5
$t = 86$	9,59	5
$t = 87$	11,23	5

Табела П4 (наставак 2) – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 4, $T = 93$)

Начин отказа	y_t	c_{1t}
$t = 88$	11,77	5
$t = 89$	9,59	5
$t = 90$	8,90	5
$t = 91$	15,97	5
$t = 92$	12,07	5
$t = 93$	8,08	5

Узорак 5:

Функција циља:

$$\max_{j=1,\dots,J} (y_t)$$

Ограничење:

$$\sum_{j=1,\dots,J} c_j \leq 1200$$

Табела П5 – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 5, $T = 146$)

Начин отказа	y_t	c_{1t}
$t = 1$	5,126	10
$t = 2$	6,635	5
$t = 3$	8,099	0
$t = 4$	7,295	10
$t = 5$	11,986	10
$t = 6$	7,327	5
$t = 7$	7,327	5
$t = 8$	12,117	15
$t = 9$	7,766	0
$t = 10$	8,509	20
$t = 11$	8,530	15
$t = 12$	8,509	20
$t = 13$	13,124	10
$t = 14$	8,818	10
$t = 15$	9,921	10
$t = 16$	17,492	5
$t = 17$	9,825	25
$t = 18$	8,790	15
$t = 19$	8,790	15
$t = 20$	8,790	15
$t = 21$	7,105	20
$t = 22$	8,847	5
$t = 23$	8,818	10
$t = 24$	17,376	10
$t = 25$	13,067	15
$t = 26$	17,149	20
$t = 27$	11,567	20
$t = 28$	17,149	20
$t = 29$	31,983	25
$t = 30$	8,733	25

Табела П5 (наставак 1) – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 5, $T = 146$)

Начин отказа	Y_t	C_{1t}
$t = 31$	18,123	25
$t = 32$	47,347	25
$t = 33$	9,810	30
$t = 34$	8,790	15
$t = 35$	8,762	20
$t = 36$	8,762	20
$t = 37$	11,567	20
$t = 38$	6,822	15
$t = 39$	17,149	20
$t = 40$	27,477	15
$t = 41$	9,810	30
$t = 42$	9,338	15
$t = 43$	9,369	10
$t = 44$	9,308	20
$t = 45$	7,207	25
$t = 46$	5,644	5
$t = 47$	8,293	5
$t = 48$	26,370	5
$t = 49$	9,399	5
$t = 50$	16,486	0
$t = 51$	16,486	0
$t = 52$	16,377	5
$t = 53$	28,070	5
$t = 54$	6,012	0
$t = 55$	15,415	0
$t = 56$	50,944	5
$t = 57$	16,427	5
$t = 58$	11,667	10
$t = 59$	11,616	15
$t = 60$	11,667	10
$t = 61$	27,477	15
$t = 62$	7,716	0
$t = 63$	19,280	5
$t = 64$	44,552	5
$t = 65$	9,857	20
$t = 66$	20,006	35
$t = 67$	20,135	30
$t = 68$	20,006	35
$t = 69$	31,415	35
$t = 70$	31,101	40
$t = 71$	31,101	40
$t = 72$	31,415	35
$t = 73$	31,415	35
$t = 74$	31,415	35
$t = 75$	19,879	40
$t = 76$	19,879	40
$t = 77$	20,135	30
$t = 78$	42,059	0
$t = 79$	9,486	10
$t = 80$	17,376	10
$t = 81$	25,181	5
$t = 82$	23,124	0
$t = 83$	9,569	0
$t = 84$	49,994	10

Табела П5 (наставкак 2) – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 5, $T = 146$)

Начин отказа	Y_t	C_{1t}
$t = 85$	25,669	0
$t = 86$	51,734	0
$t = 87$	7,766	0
$t = 88$	15,415	0
$t = 89$	9,559	0
$t = 90$	13,020	20
$t = 91$	11,517	25
$t = 92$	12,964	25
$t = 93$	11,567	20
$t = 94$	14,581	40
$t = 95$	10,900	30
$t = 96$	10,406	20
$t = 97$	6,788	25
$t = 98$	19,100	30
$t = 99$	7,187	5
$t = 100$	62,540	10
$t = 101$	7,766	0
$t = 102$	13,011	20
$t = 103$	7,237	20
$t = 104$	7,657	20
$t = 105$	9,366	10
$t = 106$	7,166	10
$t = 107$	8,478	30
$t = 108$	8,457	35
$t = 109$	8,907	25
$t = 110$	10,917	25
$t = 111$	31,101	40
$t = 112$	32,775	40
$t = 113$	10,900	30
$t = 114$	10,356	30
$t = 115$	14,303	35
$t = 116$	8,457	35
$t = 117$	8,478	30
$t = 118$	17,149	20
$t = 119$	9,445	15
$t = 120$	20,851	10
$t = 121$	22,387	15
$t = 122$	11,567	20
$t = 123$	8,752	10
$t = 124$	15,880	5
$t = 125$	11,718	5
$t = 126$	8,089	20
$t = 127$	9,281	25
$t = 128$	8,478	30
$t = 129$	20,814	45
$t = 130$	11,299	50
$t = 131$	8,809	50
$t = 132$	8,809	50
$t = 133$	8,809	50
$t = 134$	11,299	50
$t = 135$	11,299	50
$t = 136$	11,299	50
$t = 137$	11,299	50
$t = 138$	11,299	50

Табела П5 (наставак 3) – Улазни подаци за примену хеуристичких метода (узорак 5, $T = 146$)

Начин отказа	y_t	c_{1t}
$t = 139$	8,876	0
$t = 140$	4,960	10
$t = 141$	7,297	0
$t = 142$	7,297	0
$t = 143$	7,733	0
$t = 144$	8,876	0
$t = 145$	6,873	0
$t = 146$	5,151	0

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Никола Коматина је рођен 8. новембра 1993. године у Чачку. Одрастао је у Ивањици, где је завршио основну и средњу школу. Након завршене средње школе, 2012. године је уписао основне академске студије на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, одредивши се за смер Машинско инжењерство, модул Индустијски инжењеринг. Завршни рад из наставног предмета Организација рада, на тему: „Оцена утицаја уређаја за рециклажу на животну средину у фази процеса производње применом TOPSIS методе”, одбранио је оценом 10, чиме је стекао звање Инжењер машинства.

Након завршених основних академских студија, 2015. године је уписао мастер академске студије на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, одредивши се за исти смер и модул. Мастер рад из наставног предмета Организација производње и операциона истраживања, на тему: „Модел за одређивање ефикасности пословања производног ланца снабдевања”, одбранио је оценом 10, чиме је стекао звање Мастер инжењер машинства.

Основне академске студије у домену Инжењерског менаџмента уписао је 2021. године на Факултету техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу. Дипломски рад из наставног предмета Организација производње, на тему: „Анализа тренда тражње и неусаглашености у процесу производње”, одбранио је оценом 10, чиме је стекао звање Дипломирани инжењер менаџмента.

Докторске академске студије је уписао 2017. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, одредивши се за смер Индустијско инжењерство и инжењерски менаџмент. Положио је све испите предвиђене планом и програмом студија са просечном оценом 10,00.

У досадашњем научно-истраживачком раду проучавао је проблеме попут унапређења квалитета и поузданости пословних процеса, анализе и процене ризика у домену индустрије, планирања производње и др. Посебна пажња била је усмерена на унапређење *PFMEA* анализе, као и на примену и унапређење метода вишекритеријумске оптимизације, што се може констатовати увидом у објављене радове.

Учествовао је у реализацији неколико научно-истраживачких пројеката. Као истраживач-приправник, од маја 2018. године, ангажован је на научно-истраживачком пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја: ТР-35033 - „Одрживи развој технологија и опреме за рециклажу моторних возила”. Од августа 2020. године запослен је на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у звању истраживач-сарадник. До сада је објавио више од 40 научних радова, од чега је 11 радова објављено у часописима индексираним на *SCI* листи, док је више од 20 радова објављено у зборницима међународних конференција.

Од ступања у радни однос, односно од 2018. године, ангажован је и у реализацији наставе на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. На основним академским студијама био је ангажован на следећим предметима: Производни системи, Организација рада, Статистика у инжењерству, Основи предузетничког менаџмента и економије и Теорија одлучивања. Осим тога, био је ангажован и на мастер академским студијама и то на предметима: Операциона истраживања, Менаџмент пројектима и Истраживачки рад у инжењерству.

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Никола Коматина, изјављујем да докторска дисертација под насловом:

УНАПРЕЂЕЊЕ ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНЕ
RFMEA АНАЛИЗЕ И МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИЈЕ

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

у Крагујевцу, 20. 6. 2023. године,

Никола Коматина

потпис аутора

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ја, Никола Коматина, изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:

УНАПРЕЂЕЊЕ ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНЕ
RFMEA АНАЛИЗЕ И МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИЈЕ

истоветне.

у Крагујевцу, 20. 6. 2023. године,



потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Никола Коматина,

- дозвољавам
 не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

УНАПРЕЂЕЊЕ ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ ПРИМЕНОМ МОДИФИКОВАНЕ
RFMEA АНАЛИЗЕ И МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИЈЕ

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу, и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

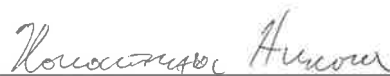
- дозвољавам
 не дозвољавам¹

¹ Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада²

у _____ Крагујевцу _____, _____ 20. 6. 2023. _____ године,



потпис аутора

² Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>