



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Милош Н. Јовичић

**ФРАГИЛНОСТ КАО ФАКТОР РИЗИКА КОД
ВИСОКО ОПТИМИЗОВАНИХ LEAN ПОСЛОВНИХ
СИСТЕМА**

докторска дисертација

Крагујевац, 2022



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

Miloš N. Jovičić

**FRAGILITY AS A RISK FACTOR AT HIGHLY
OPTIMIZED LEAN ENTERPRISES**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2022

Аутор
Име и презиме: Милош Јовичић
Датум и место рођења: 1.9.1991. год., Чачак, Република Србија
Садашње запослење: Истраживач сарадник, Истраживачко-развојни институт за вештачку интелигенцију Србије, Нови Сад
Докторска дисертација
Наслов: ФРАГИЛНОСТ КАО ФАКТОР РИЗИКА КОД ВИСОКО ОПТИМИЗОВАНИХ LEAN ПОСЛОВНИХ СИСТЕМА
Број страница: 144
Број слика: 64
Број библиографских података: 147
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Научна област (УДК): Индустијско инжењерство и инжењерски менаџмент: Индустијско инжењерство, Конторла квалитета, Информациони инжењеринг; УДК: 007.51:331.45(043.3), 005.6:681.3.06(0.43.3), 681.3:658.56(0.43.3)
Ментор: др Иван Мачужић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Оцена и одбрана
Датум пријаве теме:
Број одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације: IV-04-485/10 од 12.06.2019.
Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата:
<ol style="list-style-type: none"> 1. др Данијела Тадић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна области: Производно машинство, Индустијски инжењеринг – председник Комисије; 2. др Александар Алексић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Индустијско инжењерство и инжењерски менаџмент; 3. др Марко Ђапан, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Индустијско инжењерство и инжењерски менаџмент ; 4. др Стеван Милисављевић, ванредни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, ужа научна област: Квалитет, ефективност и логистика; 5. др Иван Мачужић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Индустијско инжењерство и инжењерски менаџмент;
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:
<ol style="list-style-type: none"> 1. др Марко Ђапан, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Ужа научна област: Индустијско инжењерство, председник Комисије; 2. др Александар Алексић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Ужа научна област: Инжењерски менаџмент, члан Комисије; 3. др Петар Станојевић, ванредни професор, Факултет безбедности Универзитета у Београду, Ужа научна област: Науке безбедности, члан Комисије;
Датум одбране докторске дисертације:

Захвалност

Најискреније се захваљујем свом ментору др Ивану Мачужићу, редовном професору, на указаном поверењу, великој помоћи, корисним и стручним саветима током израде ове дисертације.

Велику захвалност дугујем др Петру Станојевићу, ванредном професору, на корисним и стручним саветима, као и др Горану Бошковићу, ванредном професору на помоћи око техничке обраде докторске дисертације. Такође, захваљујем се др Миладину Стефановићу, редовном професору, на помоћи и стручним саветима које ми је давао током израде докторске дисертације.

Највећу захвалност на разумевању и несебичној подршци дугујем мојој породици.

Резиме

Симулационе методологије пружају низ могућности у анализи, управљању и контроли пословних система. Континуални развој симулационих модела и њихова интеграција са моделима за вештачку интелигенцију постаје све учесталија у индустријском инжењерству и инжењерском менаџменту, а све са циљем бољег управљања процесима. У докторској дисертацији сагледан је сегмент примене временски зависних симулационих модела, који још увек нису довољно заступљени у односу на друге методологије у индустријском инжењерству. Анализа ризика пословних система у комбинацији са динамичким симулацијама, представљала је главни циљ израде докторске дисертације. Такође предмет истраживања био је усмерен ка развоју новог алата за анализу ризика код пословних система. Анализа фрагилности система пре публиковања научних радова који чине основу докторске дисертације, није имала широку примену изван финансијског сектора. Сходно томе било је потребно сагледати могућности адаптације ове хеуристичке методологије за примену на друге економске ентитете, изван финансијског сектора. Предмет истраживања су били LEAN системи, и њихово динамичко понашање под утицајем различитих стресора. LEAN пословни системи се често класификују као високо оптимизованим и ефикасни у својим операцијама, међутим ови системи могу показати низ структуралних недостатака у реакцији на екстерну и интерну волатилност. Као предмет докторске дисертације било је креирање симулационих модела који су у могућности да детектују фрагилност високо оптимизованих LEAN система. Креирани су симулациони модели, оптимизовани за анализу фрагилности, где је анализирана фрагилност у оквиру здравства и сектора комуналног отпада. Анализирани системи се могу класификовати као LEAN системи, који су кроз спроведене анализе показали фрагилност на нежељене нагле промене. Може се закључити да комбиновање симулационих технологија са хеуристичким методама за анализу ризика може допринети развоју области менаџмента ризиком.

Кључне речи: динамика система, менаџмент ризиком, LEAN системи, анализа фрагилности система, симулације засноване на агентима, симулације дискретних догађаја

Abstract

Simulation methodologies offer a large spectrum of capabilities in analyzing and managing industrial and service-based systems. In order to improve process management, industrial engineering and engineering management are placing an increasing emphasis on the continuous development of simulation models and their integration with artificial intelligence models. The dissertation examines the area of time-dependent simulation model application, which is still understudied in industrial engineering when compared to other approaches. In the doctoral thesis a highly neglected segment of simulation modeling applications was analyzed. Combining dynamic simulations with risk analysis, represents the central goal of the doctoral thesis. Additionally, research initiative of the thesis was focused on the development of new tools for enterprise risk analysis. The fragility risk analysis, prior to the publications that the doctoral thesis is based upon, did not see many applications outside of the financial sector. Consequently, new methods for adapting this heuristic methodology for economic entities outside of the financial sector was developed. The subject of research was LEAN systems and their dynamic behavior under the influence of various stressors. LEAN business systems are often classified as highly optimized and efficient in their operations; however, these systems can exhibit a number of structural weaknesses in their reaction to external and internal volatility. As the subject of the doctoral dissertation, the creation of simulation models capable of detecting fragility in highly optimized LEAN systems was undertaken. Simulation models optimized for fragility analysis were created, with fragility being analyzed in the context of the healthcare and municipal waste sectors. The analyzed systems can be classified as LEAN systems, which through the conducted analysis showed fragility in response to unwanted changes. The doctoral dissertation concludes that the combination of simulation technologies with heuristic methods for risk analysis can contribute to the development of the field of risk management.

Key words: System dynamics, Risk management, LEAN systems, Fragility analysis, Agent Based Simulations, Discrete Event Simulations

САДРЖАЈ

1.	УВОД.....	1
1.1.	Мотивација.....	1
1.2.	Преглед литературе.....	2
1.3.	Циљ рада	7
1.4.	Методе истраживања.....	7
1.5.	Садржај рада.....	8
2.	МОДЕЛИРАЊЕ ДИНАМИКОМ СИСТЕМА.....	10
2.1.	Симулације засноване на ДС моделирању.....	11
2.2.	Основни алати ДС моделирања	14
2.2.1.	Ефекат каузалности дефинисан преко повратних (feedback) петљи	16
2.2.2	Временско кашњење I реда.....	17
2.2.3	Временско кашњење вишег реда	19
2.2.4	Информационо кашњење	19
2.2.5	Нумеричке методе у ДС симулацијама	20
2.3.	Моделирање и симулације различитих комплексних система.....	21
3.	LEAN МЕТОДОЛОГИЈА	26
3.1.	LEAN теоријски аспекти и алати	26
3.2.	LEAN старт-ап.....	28
3.3.	Теорија ограничења.....	29
3.4.	Симулација ефекта уског грла.....	32
3.5.	Симулација ограничења код паралелних процеса	36
3.6.	Дефинисање ризика код LEAN предузећа - континуално смањење трошкова.....	40
4.	МЕНАџМЕНТ РИЗИКОМ	43
4.1.	Врсте и приступи у управљању ризиком.....	44
4.2.	Процес митигације ризика	48
4.3.	Фрагилност као концепт за анализирање ризика система.....	49
4.4.	Симулација фрагилности система	51
4.5.	Хеуристички приступ у анализи фрагилности система.....	54
4.5.1	Предвиђање фрагилности, антифрагилности и робусности	55
4.5.2	Хеуристичка класификација система на основу карактеристика дистрибуције вероватноће стресора.....	56
4.5.3	Општа форма функције за процену фрагилности система	58
4.5.4	Дефинисање трансфер функције фрагилности.....	60
4.5.5	Дефинисање Вега функције осетљивости применом методе коначних разлика	61
4.5.6	Дефинисање трансфер функције фрагилности применом методе коначних разлика	63
4.5.7	Псеудоалгоритам за процену фрагилности у стрес - тесту.....	65
4.5.8	Симулација стрес - теста фрагилности заснованог на хеуристичком приступу	66
4.5.9	Утицај избора домена интеграције на добијени праг фрагилности у стрес - тесту.....	69

4.6.	Симулација фрагилности заснована на концепту прага перкулације.....	70
5.	СИМУЛАЦИЈА ФРАГИЛНОСТИ LEAN ЗДРАВСТВЕНОГ СИСТЕМА	74
5.1.	Моделирање пандемије	75
5.2.	Модел функционисања LEAN болнице у условима COVID-19 пандемије.....	78
5.3.	Приступуи у креирању модела болнице	80
5.3.2	Моделирање расположивих ресурса болнице	83
5.4.	Резултати симулације.....	85
5.4.1	Базна симулација модела	85
5.4.2	Анализа фрагилности болничког система.....	89
6.	СИМУЛАЦИЈА РИЗИКА МАКРО ПОСЛОВНОГ СИСТЕМА	93
6.1.	Модел за прорачун главних индикатора комуналног отпада	94
6.2.	Индикатори комуналног отпада.....	96
6.2.1	Укупна количина генерисаног комуналног отпада.....	96
6.2.2	Третирани комунални отпад	97
6.2.3	Количина рециклираног комуналног отпада	97
6.2.4	Вредности индикатора комуналног отпада	98
6.3.	Модел сектора комуналног отпада креиран у динамици система	100
6.4.	Резултати симулације.....	102
6.4.1	Базни сценарио	103
6.4.2	Сценарио за оптимални потенцијал рециклаже	105
6.5.	Ограничења и фрагилност система	108
6.5.1	Анализа фрагилности комуналног сектора на парцијалну ликвидацију активности	113
7.	ЗАКЉУЧАК.....	116
8.	ЛИТЕРАТУРА	120
	БИОГРАФИЈА КАНДИДАТА.....	142

ЛИСТА СЛИКА

- Слика 2.1 Области компетенције ДС, СДД и СЗА симулације у зависности од нивоа апстракције система (Borshchev and Filippov, 2004)
- Слика 2.2 Пет основних елемената ДС моделирања
- Слика 2.3 Каузалност у ДС моделима
- Слика 2.4 Математичко дефинисање основне структуре у ДС моделирању (Serman, 2000)
- Слика 2.5 Израчунавање вредности функције нивоа у временском тренутку K (Златановић, 2012)
- Слика 2.6 Дијаграм повратне (feedback) петље (Meadows, 2012)
- Слика 2.7 ДС модел $S(t)$ функције нивоа у случају временског кашњења I реда између стопа прилива $P(t)$ и одлива $O(t)$
- Слика 2.8 ДС модел за симулацију информационог кашњења
- Слика 2.9 Различите врсте система и њихова расподела по степену комплексности и неизвесности
- Слика 2.10 Стандардни приступ (лево) и динамички приступ (десно)
- Слика 2.11 Упрошћени динамички модел популације
- Слика 2.12 Однос поузданости модела и његове величине (Lobão and Porto, 1997)
- Слика 3.1 Процес имплементације LEAN старт-ап методе
- Слика 3.2 Модел производног погона
- Слика 3.3 Капацитети производних процеса
- Слика 3.4 Акумулација залиха испред производних процеса
- Слика 3.5 Акумулација залиха након дуплирања капацитета производних процеса
- Слика 3.6 Модел производног погона са паралелним процесима
- Слика 3.7 Стање производног погона са паралелним процесима након извршене симулације
- Слика 3.8 Акумулација залиха испред процеса током целокупног времена симулације
- Слика 3.9 Акумулација залиха испред процеса краћи период
- Слика 4.1 Конвенционални приступ у циклусу управљања ризиком (Hubbard, 2020)
- Слика 4.2 Алтернативни приступ за анализу и митигацију ризика
- Слика 4.3 Универзалне стратегије за митигацију ризика
- Слика 4.4 Нелинеарно понашање фрагилног система
- Слика 4.5 Подела система на основу изложености позитивним и негативним стресорима а) робустан; б) фрагилан; ц) антифрагилан
- Слика 4.6 Варијација естимационе функције фрагилности на левом полудомену расподеле вероватноће за: а) $\varphi(K, s^- + \Delta s)$ и б) $\varphi(K, s^- - \Delta s)$

- Слика 4.7 Илустрација утицаја повећања стандардне девијације расподеле на леви полу-домен расподеле
- Слика 4.8 Општа форма трансфер функције за различите параметре дистрибуције случајне променљиве у стрес-тесту
- Слика 4.9 Конвексност Вега функције осетљивости система
- Слика 4.10 Расподела стресора система
- Слика 4.11 Расподела густине вероватноће за анализирани стрес-тест
- Слика 4.12 Естимационе функције фрагилности израчунате за варијацију стандардне девијације $\Delta\sigma = \pm 15\%$
- Слика 4.13 Вега функција осетљивости система након изложености система стресорима приказаним на Слици 4.10
- Слика 4.14 Трансфер функција фрагилности на домену интеграције $[-3\sigma, K]$
- Слика 4.15 Вега функција осетљивости у стрес тесту на домену интеграције $[-6\sigma, K]$
- Слика 4.16 Трансфер функција фрагилности за избрани домен интеграције од $[-6\sigma, K]$
- Слика 4.17 Симулација пожара у дефинисаној густини шуме од 59%
- Слика 4.18 Симулација ширења пожара при густини од 61%
- Слика 5.1 Сегментација модела по нивоу апстракције и очекиване поузданости модела
- Слика 5.2 Моделирање и симулација кретања људи у виртуалном простору (Frigoryev, 2022)
- Слика 5.3 Проток и лечење пацијената кроз болнички систем
- Слика 5.4 Сегмент модела за прорачун расположивог лекарског особља
- Слика 5.5 Симулација расположивости средстава личне заштите
- Слика 5.6 Прорачун расположивих кревета у болничком систему
- Слика 5.7 Сегмент модела који симулира проток пацијената након пуштања симулације
- Слика 5.8 Побољшање симптома код пацијената у критичном стању
- Слика 5.9 Преминули пацијенти на дневном нивоу у базној симулацији
- Слика 5.10 Расположиви капацитети медицинског особља у базној симулацији
- Слика 5.11 Дијаграм процентуалног односа заражених и активних лекара
- Слика 5.12 Укупан број преминулих пацијената у базној симулацији
- Слика 5.13 Укупан број излечених пацијената у базној симулацији
- Слика 5.14 Дијаграм расположивог лекарског особља
- Слика 5.15 Фактор стреса на медицинско особље
- Слика 5.16 Укупан број излечених пацијената базног сценарија и сценарија анализе
- Слика 5.17 Број преминулих пацијената у базном сценарију и анализи фрагилности
- Слика 6.1 Макро дијаграм токова комуналног отпада на територији Републике Србије
- Слика 6.2 Извор и дестинација раздвојено сакупљеног комуналног отпада

-
- Слика 6.3 Макро модел комуналног сектора у динамици система (Jovičić, et al., 2022)
- Слика 6.4 Под-модел за анализу неформалног сектора (Jovičić, et al., 2022)
- Слика 6.5а Пројекције базног сценарија за кључне индикаторе (Jovičić, et al., 2022)
- Слика 6.5б Пројекција базног сценарија за остварени степен рециклаже (Jovičić, et al., 2022)
- Слика 6.6а Сценарио оптималног рециклажног потенцијала и вредности: GEN, COL_SEP, MIX_MSW и RCU (Jovičić, et al., 2022)
- Слика 6.6б Однос стопе рециклаже у сценарију за оптимални рециклажни потенцијал и прописаних циљева ЕУ (Jovičić, et al., 2022)
- Слика 6.7 Ликвидација неформалног сектора (Jovičić, et al., 2022)
- Слика 6.8 Пад у капацитету неформалног сектора и нови капацитет комуналних предузећа (Jovičić, et al., 2022)

ЛИСТА ТАБЕЛА

- Табела 3.1 Формуле модела производног погона
- Табела 3.2 Формуле модела производног погона са паралелним процесима
- Табела 3.3 Перформансе система у зависности од локације уског грла
- Табела 4.1 Избор функције $\eta(x)$ у зависности од области примене (Taleb, 2009)
- Табела 4.2 Pdf функција $f(x)$ у зависности од изабраног типа дистрибуције (Гадић и сар., 2014)
- Табела 6.1 Расподела фракција комуналног отпада за 2020. годину
- Табела 6.2 Параметри комуналног отпада за период 2016-2020
- Табела 6.3 Индикатори комуналног отпада за период 2016-2020
- Табела 6.4 Индикатори комуналног отпада у базном сценарију
- Табела 6.5 Максималне стопе примарне сепарације по фракцијама отпада и прорачунате стопе раста за период од 2020 до 2035. године
- Табела 6.6 Оптимална стопа рециклаже за 2035. годину
- Табела 6.7 Индикатори комуналног отпада прорачунати за сценарио оптималног рециклажног потенцијала
- Табела 6.8 Преглед раздвојено сакупљеног комуналног отпада у сценарију за оптимални рециклажни потенцијал

ЛИСТА ОЗНАКА

Ознака	Назив
ALR	Average Loss Rate (Просечне стопе губитака)
LEAN	Lean (Методологија унапређења перформанси) система
JIT	Just In Time
PDCA	Plan Do Check Act
ERM	Enterprise Risk Management
DR&BCP	Disaster recovery and business continuity planning
SIMPLE	Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equations
SIR	Susceptible, Infectious or Recovered
GEN	Генерисани отпад
RCY	Количина рециклираног комуналног отпада
RCY_R	Стопа рециклаже комуналног отпада
RCV	Поновно искоришћени комунални отпад
RCV (R3, R4, R5)	Количина раздвојено прикупљеног отпада третираног поступцима R3, R4 и R5
DSP	Одложени комунални отпад
TRT	Третирани комунални отпад
ГИО	Годишњи извештај о отпаду
ДС	Динамика система
НРИЗ	Национални регистар извора загађивања
СКО	Сектор комуналног отпада
СДД	Симулације дискретних догађаја
СЗА	Симулације засноване на агентима
ТО	Теорија ограничења

ТПС	Тојота производни систем
ПМФ	Производ минималне функционалности
ПП	Праг перкулације (Percolation threshold)
$S(t)$	Функција нивоа параметра система
$P(t)$	Стопа прилива параметра система
$O(t)$	Стопа одлива параметра система
H^s	Трансфер функција фрагилности
$\varphi(x)$	Естимационе функције фрагилности система
K	Праг фрагилности или праг неизвесности
σ	Стандардна девијација нормалне Гаусове расподеле
μ	Средња вредност
X	Случајна променљива
H^s	Трансфер функција фрагилности
$E_{(s^-)}(X)$	Математичко очекивање случајне променљиве X
s^-	Средња девијација на левом репу дистрибуције стресора
$f_n(x)$	Pdf функција
V_{s^-}	Вега осетљивост функције φ на левом полудомену дистрибуције вероватноће стресора X
$\mathbb{R} \in [0, +\infty)$	Скуп позитивних реалних бројева
I	Скуп целих бројева
$n \in I$	Цео број
δ_h	Пертурбациони интервал на домену $(-3\sigma, K]$

1. УВОД

1.1. Мотивација

Циљ и мотивација спроведених истраживања који су основа докторске дисертације је сагледавање потенцијалних недостатака различитих система који се класификују као "LEAN", као и анализа и примена алтернативних приступа менаџмента ризиком. Докторска дисертација сагледава могућности интеграције симулационих технологија у анализи и митигацији ризика. Конвенционални приступи у менаџменту ризиком засновани на квалитативним методама, експертском мишљењу, као и великим скуповима историјских података о систему, имају низ недостатака и захтевају континуално унапређење (Hubbard, 2020). Докторска дисертација препознаје генерални значај LEAN методологије, која има за циљ континуална унапређења активности компанија и других организација. Имплементација LEAN методологије се може окарактерисати као битан сегмент у постизању бољег оперативног и финансијског функционисања компанија различитих индустрија, као и целокупне економије. Сходно томе, предмет истраживања је усмерен ка често дефектним имплементацијама LEAN методологије, које имају за циљ максимизацију финансијских перформанси у краћем временском периоду, без адекватног сагледавања будуће изложености различитим ризицима. Анализирани су и потенцијални недостаци LEAN методологије у условима честих и већих дисрупција у ланцима снабдевања и дистрибуције. Почетак COVID-19 пандемије 2020. године је указао на ниску одрживост глобалних и локалних ланаца снабдевања (Paul, Chowdhury, 2020; Rowan, Laffey, 2020), и ставио акценат на низ недостатака код компанија и ланаца снабдевања, који су представљали успешне примере LEAN трансформације (Sarkis, 2020). Висока комплексност индустријских и услужних пословних система, спречава адекватно коришћење многих алата за анализу и митигацију ризика, самим тим докторска дисертација је анализирала алтернативне приступе за идентификацију високо утицајних ризика. Кроз анализу новије литературе везане за управљање ризиком, и сагледавање генералне корисности различитих методологија, идентификована је хеуристичка методологија анти-фрагилности и фрагилности (кртости) система (Taleb, Douady, 2013), као потенцијално адекватан приступ за анализу комплексних система.

Развој нових приступа за анализу ризика у области индустријског инжењерства и инжењерског менаџмента, представља кључни циљ докторске дисертације. Спроведено истраживање има за циљ и да употпуни генерални дефицит коришћења симулационих технологија у анализи и митигацији ризика (Jovičić, et al., 2022).

1.2. Преглед литературе

Симулационе технологије намењене за анализу пословних система настају средином 20. века, и представљају значајан помак у могућностима контроле и оптимизације пословних процеса (Robinson, 2005; Forrester, 2007). Код анализе и оптимизације пословних система три најкоришћеније компјутерски подржане симулационе методологије су: динамика система (ДС), симулације дискретних догађаја (СДД) и симулације засноване на агентима (СЗА) (Borshchev and Filippov, 2004). Симулационе технологије омогућавају виртуално окружење за тестирање различитих стратегија и оптимизација пословних система (Richardson, 1999). Најмодернија симулациона методологија за анализу различитих комплексних система је СЗА, која постаје комерцијална почетком 21. века (Wilensky and Rand, 2015). Први програмски језик који је омогућио симулације динамиком система настао је 1958. године под називом SIMPLE (Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equations) (Azab and Geddawy, 2012). У наредним деценијама настају десетине различитих софтверских пакета за моделирање и симулације динамиком система (Borshchev and Filippov, 2004). ДС се може користити за високо апстрактно стратешко планирање, попут планирања и управљања природним ресурсима на националном (Winz et al., 2009) или глобалном нивоу (Meadows, Randers, 2012), формирања националне енергетске инвестиционе политике (Aslani, 2014) до макро планирања и реконструкције јавних здравствених система (Homer and Hirsch, 2006). Такође, ДС модели могу имати употребу у решавању проблема ниже апстракције, попут управљања ризичним и комплексним пројектима (Serman, 1992), оптимизације грађевинских пројеката (Han, et al., 2013) и свакодневних активности у здравственом сектору (Davahli et al., 2020). Широки спектар употребе ДС модела се може увидети и анализом објављених књига које дефинишу примену динамике система на различите области, попут економије (Cavana et al., 2021), симулације биолошких система (Ruth, Hannon, 1997), екологије (Ford, 1999), пословног планирања и стратешког менаџмента (Morecroft, 2015), финансија и банкарства (Yamaguchi, 2013), индустријског менаџмента (Serman, 2000), итд. Посебно велики утицај на развој ДС методологије и њену широку примену у различитим областима, имале су и публикације: Индустријска динамика (Forrester, 1997), Пословна динамика (Serman, 2000), Урбана динамика (Forrester, 1970), као и Границе раста (Limits to Growth) (Meadows, et. al, 1972).

LEAN методологија и њена масовна имплементација у производном сектору Јапана је имала битну улогу у смањењу светске доминације аутомобилског сектора САД-а 70-их година прошлог века (Roos and Womack, 1991). Након препознавања вредности LEAN методологије, започиње изучавање и масовна имплементација ове методологије на светском нивоу (Liker, 2004). Алата и методе LEAN-а, имају за циљ континуално унапређење перформанси пословних система, кроз приступ елиминације процесног вишка унутар система (Hampson, 1999). Ова методологија је током година остварила широку употребу у свим секторима економије (Bortolotti, et al., 2015). Основни теоријски део LEAN-а, као и већина алата, произилази из филозофије ТПС (Тојота производни

систем) (Baluch, et al., 2012). LEAN као термин за елиминацију вишка и континуално унапређење се појављује први пут у академској литератури заснованој на ТПС-у (Маџуџић и Ђарап, 2016). У LEAN методологији дефинишу се осам врста “вишка” унутар система: транспорт, залихе, чекање, дефекти, непотребни покрети (машина или људи), прекомерна производња, прекомерно процесирање и неискоришћеност талента (Ahmed and Chowdhury, 2018). Важни доприноси LEAN-а и ТПС-а су промовисање производних стратегија: ЈИТ (Just in time) и Pull производње (Sugimori, Kusunoki and Cho, 1977). Производне стратегије ЈИТ и Pull налажу усклађивање система према потребама и потражњи корисника (Daine, Winnington and Head, 2011). Током година креирају се нови концепти у оквиру LEAN методологије, попут “LEAN старт-ап” приступа (Bortolini, et al., 2018). LEAN старт-ап приступ има за циљ да обезбеди бољу адаптацију производа према потребама тржишта (Eisenmann, 2012). Овај концепт се први пут појављује 2009. године, и постаје масовно имплементиран у технолошком сектору (Ries, 2009). Сви менаџерски алати и методе који у свом имену имају LEAN фокусирани су на елиминацију вишка и усклађивање система или производа према тржишту (Lenarduzzi and Taibi, 2016). Креирање LEAN старт-ап приступа је од изузетног значаја ако се узме у обзир степен неуспеха пласирања нових технологија и производа на тржиште, који у многим индустријама достиже и до 90% (Јовичић, et. al., 2019). Поред LEAN-а и ТПС-а, често примењена методологија за подизање продуктивности система је теорија ограничења (ТО) (Rahman, 1998). ТО произилази из комерцијалног софтверског алата за идентификацију уског грла у производним системима (Spencer and Cox, 1995). Стратегија оптимизације система где је акценат стављен на подизање протока на уском грлу (главно ограничење), показала се ефикасном у производном и услужном сектору (Watson, 2007). ТО је фокусирана на процес балансирања протока и избегавања стратегија балансирања капацитета (Andelkovic, et al., 2013). ТО је заснована на 5 итеративних корака, који имају универзалну примену у свим системима заснованим на процесу (Goldratt, 1990).

Методолошке операционе стратегије, попут LEAN-а, су често примењене као систем за континуално смањење операционих трошкова (Baranov, et. al., 2010). Поред повећања продуктивности система, успешна LEAN имплементација ставља акценат и на континуално смањење трошкова (Јаџ, et. al., 2013). Теоретска основа LEAN приступа не пропагира стратегију смањења трошкова кроз елиминацију вишка радних места у компанији која су продукт повећања продуктивности, међутим ова стратегија је често присутна у пракси (Womack and Jones, 1997). Такође, ЈИТ и LEAN креирају структуралне промене у организацији рада, и смањују потребу за радницима који су у сталном радном односу (Kalleberg, 2009). Агресивно смањење радне снаге и распродаја вишка производних капацитета, након успешног подизања продуктивности је учестала појава у пракси (Hooke, 2021). Компаније често улазе у процес цикличног подизања и смањења капацитета, што се показало као високо ризична стратегија и лоша алокација капитала (Chancellor, 2016). Недостатак LEAN система је и њихово занемаривање бафер (buffer) залиха, што систем чини осетљивим на шокове (Нuo, Voxall, 2018). Нежељени епидемиолошки догађаји могу довести до брзог колапса LEAN ланца снабдевања (Sarkis, 2020). Друге производне

стратегије указују на важност бафер залиха, као и резервних залиха ка очувању стабилности система (Schragenheim, et. al., 2009). LEAN приступ у свом фокусу на елиминацију бафер залиха креира повећање интензитета рада, као и комплексности радног окружења, што може имати значајне негативне последице на радну снагу (Jackson and Mullarkey, 2000; Huo, et al., 2022).

Препознавање постојања нежељених догађаја, које није могуће лако предвиђати из историјских података, представља битан део превенције дисрупције или колапса система (Taleb, 2007). Такви догађаји су често дефинисани као Black Swan (црни лабуд) догађаји, које одликује висок степен неизвесности и велики утицај (Aven, 2015). Битно је сагледавати осетљивост LEAN система на Black Swan догађаје. Термин Black Swan ризик има мултидисциплинарну употребу и појављује се у анализи биолошких ризика (Anderson, Branch and Cooper, 2017), индустријском менаџменту безбедности (Murphy and Conner, 2012), монетарној политици (Taylor and Williams, 2009), пројектном менаџменту (Hajikazemi, Ekambaram and Andersen, 2016), дефинисању ризика у хирургији (Vacante, D'Agata and Motta, 2012). Истраживања у области теорије менаџмента ризиком указују на недостатке стандардних алата да анализирају Black Swan догађаје, као и високо утицајне нежељене догађаје (Hubbard, 2009). Остваривање поузданих предикција о високо утицајним ризицима се показало изазовно за многе приступе у менаџменту ризиком (Jovičić, et al., 2019). Са разумевањем ограничења у предикцији великих нежељених догађаја, произилази и преиспитивање генералне корисности многих алата за планирање (Makridakis, 1981). Један од начина за анализу комплексних система и њихове изложености нежељеним догађајима је анализа фрагилности и антифрагилности система (Taleb, 2012). Фрагилан систем је описан као "лако ломљив" на одређену врсту стресора (Aven, 2014). Анализа фрагилности је битна и код анализирања резилијантности система (Sheffi, 2007). У зависности од типа стресора можемо дефинисати да ли је систем фрагилан, робустан или антифрагилан (Aven, 2013). Антифрагилни системи имају значајне разлике у односу на резилијантне системе (Größler, 2020). Фрагилност система је мерљива, док низ аспеката у мерењу ризика није могуће поуздано одредити (Taleb, 2012). Фрагилни системи при линеарном повећању стресора, генеришу нелинеарне губитке (Jovičić et al., 2019). Математички концепт који није видео примену за анализу фрагилност је концепт прага перкулације - ПП (Percolation threshold) или концепт критичног прага (Stauffert, et al., 1994). Концепт прага перкулације може бити дефинисан кроз акцелерацију губитака са линеарним повећањем одређеног параметра (Wilensky and Rand, 2015), и кроз коришћење симулација заснованим на агентима (Wilensky, 1997). Битно је назначити и концепт критичних параметара модела који се користи у динамици система (Barlas, 2007). Постоји више начина на који концепт фрагилности може бити примењен (Taleb and Douady, 2012).

Приватне и јавне фирме здравственог сектора су често дефинисане као LEAN. Такође, ови ентитети бележе динамичко понашање које се може окарактерисати као фрагилност на нагле промене (Clancy, 2015). Здравствени системи су високо комплексни, што често доводи до доношења лоших одлука у управљању ризиком (Kleinmuntz and Thomas, 1987). Ове системе одликује

присуство повратних петљи, као и застоја у процесима, самим тим очекивана је нелинеарност у динамичком понашању система (Diehl and Sterman, 1995). Имплементација нових технологија код здравствених система које имају за циљ повећање продуктивности, често доводи до повећања изложености система ка оперативним ризицима (Clancy, 2008). Посредство технологија за оптимизацију рада као и LEAN трансформација, довело је да многи здравствени системи постану фрагилни на нагле промене (Clancy, 2014). Битно је истаћи да су многе LEAN имплементације у сектору здравства дале значајна унапређења перформанси система (Kovacevic, et al., 2016). Здравствени сектор се показао као изазован и комплексан за имплементацију иновативних решења (Herzlinger, 2006). Постоје успостављене методе за анализу ефикасности здравствених система (Waring and Bishop, 2010), као и операционе стратегије за постизање бољег процесирања пацијената (de Souza, 2009). Међутим, здравствене институције на глобалном нивоу показују низак степен примене алата за елиминацију људских грешака, као и генералну митигацију препознатих ризика (Gawande, 2010). У епидемиолошким условима показатељ неспремности и фрагилности здравственог система се може манифестовати кроз висок степен инфекција здравствених радника (Bandyopadhyay, et al., 2020). Индикатор лоших капацитета за превенцију и митигацију ризика је и недостатак средстава личне заштите и осталих есенцијалних ресурса у епидемиолошким условима (Schuklenk, 2020). Глобална епидемија САРС-а је показала низ недостатака и висок степен фрагилности код здравствених система (Pack, et al., 2004; Twu, et al., 2003). Оперативни ризици Covid-19 пандемије (Ran, et al., 2020) којима су здравствени системи изложени, нису значајно различити у односу на претходне епидемије. Такође, претходне епидемије корона вируса представљају документоване ризике, који указују на недостатке система (Fehr and Perlman, 2015). Приликом моделирања епидемиолошких ризика, често се користе SIR (подложни, инфицирани и опорављени) модели (Weiss, 2013). Међутим, основне СИР структуре имају низ недостатака у симулирању интеракција агената (Shen, Taleb and Bar-Yam, 2020). Моделирање здравствених система са циљем анализе ризика и унапређења операција, спроводи се више од 40 година (Brailsford, 2007). Кроз коришћење динамике система, могуће је спровести: оптимизације перформанси ланца снабдевања болнице (Kochan, et al., 2018), оптимизације постојећих ресурса (Maliapen and Dangerfield, 2010), анализе спремности здравствених система у случају земљотреса (Khanmohammadi, Farahmand and Kashani, 2018), итд. Приликом анализе ризика болнице у епидемиолошким условима, битно је сагледати капацитет болнице (Lu, et al., 2021). Модел протока пацијената кроз болнички систем, у својој структури може бити заснован на СИР моделу (Cooper, Mondal and Antonopoulos, 2020). Сагледавање ефекта расположивости средстава личне заштите на инфекције у епидемиолошким условима, од велике је важности при анализи ризика (Kutralam-Muniasamy, et al., 2022). За анализу и оптимизације нивоа средстава личне заштите, често је коришћена динамика система као главни симулациони алат (Sigala, et al., 2022).

За креирани модел у докторској дисертацији, коришћене су вредности из постојећих симулација које сагледавају динамику хоспитализације ургентних случајева (Yeh and Lin, 2007), као и хоспитализације у условима COVID-19

пандемије (Bastos, et al., 2021; Birkmeyer, et al., 2020). Такође, коришћене су вредности из публикација које сагледавају хоспитализације COVID-19 пацијената на територији Републике Србије (Ковачевић, et al., 2022; Poskurica, et al., 2022). Пројекције модела приликом генерисања базне симулације, као и анализе фрагилности су конзистентне са анализама стопе морталитета и хоспитализација, забележених на почетку пандемије (Asch, et al., 2021).

Креиран је модел сектора комуналног отпада Републике Србије, заснован на прикупљеним подацима за период од 2016. до 2020. године (Јовичић N. and Воšković, 2021). Због комплексности сектора комуналног отпада, акценат је стављен на процес одређивања граница модела (Sterman, 2002). Модели ове врсте, креирани у динамици система, омогућавају једноставну инспекцију симулационе структуре од стране стејхолдера (Hovmand, 2014). Шта чини комунални отпад, као и начини управљања комуналним отпадом, дефинисани су Директивом о управљању отпадом креиране од стране Европског парламента (Directive 2008/98/EC). У моделу су дефинисани протоци различитих фракција отпада на годишњем нивоу, базирани на извештајима Агенције за заштиту животне средине Републике Србије. Државе чланице Европске Уније су обавезане да подносе извештаје о стању комуналног отпада (EC, and the Joint Questionnaire of Eurostat and OECD, 2021). Просечна стопа губитака по различитим фракцијама отпада, заснована је на документу CID (EU) 2019/1004, (Commission Implementing Decision, 2019), а калкулација циљева поновног искоришћења комуналног отпада је заснована на одлуци 2011/753/EU (Commission Decision 2011/753/EU, 2011). Стопа рециклаже комуналног отпада се прорачунава у складу са методологијом дефинисаном документом CID 2011/753/EU (Commission Decision 2011/753/EU, 2011). Креиран је и макро модел протока комуналног отпада на територији Републике Србије (Јовичић, et al., 2022). Главни циљ креираног модела је сагледавање могућности достизања стопе рециклаже постављене директивом (EU) 2018/851 Европског парламента (Directive 2008/98/EC). Прорачунавање вредности максималног рециклажног потенцијала засноване су на формулама публикованих у литератури (Williams, et al., 2020; Van der Linden, 2018). Креирани модел симулира динамичко понашање комуналног сектора и његових могућности да се адаптира према регулаторним променама (De Paula, Scheinkman, 2007; Rauch, 1991; Amaral, Quintin, 2006). Под-модел неформалног сектора сагледава могућности транзиције овог сектора, вредности и параметри су базирани на публикованим истраживањима за Републику Србију (Krstic and Schneider, 2015). Модел приказује очекивану динамику понашања агената и баријера ка остваривању транзиције, која је описана у другим публикацијама (Kogan, 2011; Blunch, 2015). Модел идентификује извор фрагилности и извор ограничења транзиције неформалног сектора (Massarutto, 2007). Симулација указује и на фрагилност и ограничење комуналних предузећа (ЈКП), и њихових могућности да надокнаде изгубљене капацитете које се заснивају на постојећој литератури (Minakova, et al., 2018).

1.3. Циљ рада

Циљ рада и научни допринос докторске дисертације се огледа у унапређењу приступа анализе ризика у области индустријског инжењерства и инжењерског менаџмента, на следећи начин:

1. Собзиром да постоји дефицит публикација и истраживања која сагледавају ризике и слабости LEAN пословних система, циљ докторске дисертације заснован је на дефинисању и сагледавању методологија у анализи њихових ризика и потенцијалних недостатака.
2. Спроведено истраживање има за циљ да укаже на могућности коришћења временски зависних симулационих методологија у анализи, митигацији и превенцији ризика.
3. Симулационе методологије попут Динамике система (ДС), нису имале широку примену у области менаџмента ризиком. Докторска дисертација имала је за циљ да укаже на низ бенефита приликом коришћења ДС-а као базне симулационе технологије за анализу ризика система.
4. Допринос докторске дисертације се огледа у предлагању и развоју нове методологије у анализи ризика за нефинансијске системе, јер је анализа антифрагилности и фрагилности система превасходно коришћена за ентитете у финансијском сектору.
5. У развоју анализе фрагилности за нефинансијске ентитете, утврђена је повезаност између фрагилних и LEAN система, као и концепта уског грла и фрагилности целокупног система. У оквиру докторске дисертације спроведена је и анализа других области, код којих постоје слични феномени попут фрагилности система.
6. Анализа фрагилности је примењена на неколико LEAN пословних система из сектора здравства (болница) и логистичко комуналног сектора управљања отпадом.

1.4. Методе истраживања

Научно-истраживачке методе коришћене у сврху израде ове дисертације се могу поделити на нумеричке методе, попут методе коначних разлика за решавање нелинеарних, диференцијалних једначина I реда и интегралних једначина, као и симулације засноване на агентима или ентитетима кроз коришћење Ventity софтвера.

Поред анализе LEAN методологије и шта дефинише LEAN систем, сагледана је и теорија ограничења као и анализа анти-фрагилности и фрагилности система. Генерисане симулације у докторској дисертацији, креиране су у различитим симулационим окружењима: Vensim, Ventity и AnyLogic.

Као извор података за све коришћене симулационе моделе у докторској дисертацији, коришћене су публикације у научним часописима, конференцијама, годишњим извештајима државних и Европских агенција, као и

прикупљени подаци о комуналном отпаду, у случају развоја модела за анализу сектора комуналног отпада.

1.5. Садржај рада

Докторска дисертација је сачињена од 7 поглавља:

- Поглавље 1 је сачињено од техничких сегмената докторске дисертације: увода, мотивације, прегледа литературе, циља истраживања и садржаја рада.
- Поглавље 2 сагледава аспекте моделирања динамиком система, симулацију дискретних догађаја и коришћење симулација заснованим на агентима. У другом поглављу приказани су аспекти коришћења различитих симулационих методологија, и њихове могућности и лимитације у употреби за решавање индустријских проблема. Друго поглавље детаљно описује карактеристике динамике система као симулационе методологије, превасходно намењене за примену у индустријском инжењерству и инжењерском менаџменту.
- Поглавље 3 анализира LEAN методологију као приступ оптимизацији и континуалном унапређењу пословних система. У оквиру поглавља обухваћени су теоријски аспекти LEAN методологије и њене примене у различитим пословним окружењима. Такође у оквиру овог поглавља анализирана је и теорија ограничења, која се класификује као методологија за континуално унапређење перформанси пословних система. Анализиране су разлике између наведених методологија у циљу дефинисања недостатака LEAN методологије. У оквиру поглавља креирана су два симулациона модела која имају за циљ да покажу ефекте уског грла (ограничења) у систему. У поглављу је наглашена важност операционог уског грла, као феномена који није довољно покривен алатима LEAN методологије. Крај поглавља обухвата детаљну анализу ризика који могу бити присутни код LEAN система.
- Поглавље 4 сагледава теоријске аспекте менаџмента ризиком. У оквиру четвртог поглавља анализирано је тренутно стање истраживања у области менаџмента ризиком, као и главна ограничења конвенционалних метода за анализу, митигацију и превенцију ризика. У оквиру четвртог поглавља предложена је анализа фрагилности као хеуристички приступ за анализу ризика, који има низ предности у односу на конвенционалне методе. Поглавље детаљно анализира лимитације у предикцији приликом анализе ретких нежељених догађаја попут економских криза или пандемија. Анализа фрагилности као хеуристички приступ је математички дефинисана у оквиру четвртог поглавља. У оквиру поглавља креиран је и симулациони модел у NetLogo софтверском окружењу, ка циљу поређења феномена критичног прага у анализи фрагилности.
- Поглавље 5 приказује примену анализе фрагилности на LEAN здравствени систем. Пето поглавље анализира здравствене системе који се често дефинишу као LEAN системи, и њихову потенцијалну

фрагилност на нагле промене условљене ризичним догађајима попут пандемија. У оквиру поглавља сагледани су различити приступи у моделирању здравствених система, и лимитације постојећих симулационих модела и стратегија у креирању вредности и смањењу ризика. Попут другог поглавља где су анализирани ризици LEAN методологије, пето поглавље сагледава публикована истраживања која су анализирала ризике LEAN трансформација у здравству. Креиран је модел болнице коришћењем ДС симулационог приступа, који анализира проток пацијената, расположивост лекарског особља, нивое средстава личне заштите и капацитете болнице. Модел је користио податке из публикација које су анализирале функционисање здравствених система у периоду COVID-19 пандемије. На крају поглавља упоређени су резултати анализе фрагилности са резултатима релевантних публикација.

- Поглавље 6 приказује симулацију ризика на макро нивоу, па као такво обухвата моделирање сектора комуналног отпада Републике Србије и имплементацију анализе фрагилности. У шестом поглављу моделиран је сектор комуналног отпада Републике Србије, коришћењем динамике система у Ventity софтверском окружењу, које поред коришћења динамике система пружа и могућности моделирања агената. Систем анализира могућности комуналног система да достигне циљеве прикупљања, сепарације и рециклаже комуналног отпада, постављене од стране ЕУ и Републике Србије. Модел сагледава мрежу агената који функционишу у сектору комуналног отпада, и њихове оперативне аспекте у оквиру система. За модел су коришћени прикупљени подаци као и подаци из годишњих извештаја агенција које надгледају комунални сектор. Спроведена анализа фрагилности указује на главно уско грло система, као и на могућности система да испуни постављене циљеве за прикупљање, сепарацију и рециклажу комуналног отпада.
- Поглавље 7 дефинише закључак докторске дисертације.

2. МОДЕЛИРАЊЕ ДИНАМИКОМ СИСТЕМА

Један од главних ограничења код конвенционалних економских и менаџерских алата је њихова специјализација за анализу одређених типова процеса, или изолованих сегмената пословног система (Sterman, 2000). То доводи до потребе да се прикупљање података адаптира према методи, што може проузроковати низ проблема при анализирању комплексних система.

Динамика система (ДС), као и друге симулационе методе, попут Симулације дискретних догађаја (СДД) и Симулације засноване на агентима (СЗА), пружају могућност добијања значајних закључака о системима које је тешко анализирати кроз конвенционалне статистичке методе или упрошћене формуле (Borshchev and Filippov, 2004).

Сваки од ових приступа има свој идеалан домен компетенције у којем даје најбоље резултате. Са Сlike 2.1 се види да се ДС методологија примењује за случајеве највеће апстракције, за макро и стратегијски ниво моделирања. Треба нагласити, да се ДС методологија може користити и за ниско апстрактни операциони ниво моделирања.

Могућност коришћења динамике система за моделирање дискретних догађаја, највише зависи од модуларности софтверског решења у којем се користи динамика система. Такође, подаци у оквиру комплексног модела у ДС симулацији могу бити мешовити, тј., различитог нивоа апстракције. У таквом случају неопходно је препознати проблем који модел решава, и извршити адаптацију структуре модела, као и усклађивање различитих димензија које се користе у моделу.



Слика 2.1 Области компетенције ДС, СДД и СЗА симулације у зависности од нивоа апстракције система (Borshchev and Filippov, 2004)

Слика 2.1 приказује три главна приступа у моделирању и симулацијама социјалних система. Симулације дискретних догађаја (СДД), попут динамике система, настају 50-их година прошлог века, и имају широку употребу у планирању и оптимизацији индустријских процеса (Robinson, 2005). За разлику од динамике система, СДД се користе за моделирање ниже апстракције: производни погони, кретање материјала кроз производни систем, кретање људи итд. За одређене врсте проблема, као што су дизајн и распоред производних погона унутар фабрике, планирање капацитета комерцијалних објеката или планирање саобраћајне инфраструктуре, коришћење симулација дискретних догађаја има значајне предности у односу на остале симулационе приступе. Један од разлога је и адаптација симулација дискретних догађаја за наведене типове проблема, кроз специјализоване библиотеке (Lyubchenko, et al., 2017).

Симулације засноване на агентима се често дефинишу као децентрализоване или *bottom-up* симулације (Vorshchev and Filippov, 2004). Разлог за наведену класификацију произилази из начина на који се дефинишу сегменти модела у оквиру ове методологије. Начин формирања модела произилази из дефинисања карактеристика агената и њиховог понашања. Агенти могу бити људи, тимови, машине, возила, фабрике, итд. Након дефинисања агената и одговарајућих атрибута, популација и активности, динамичко понашање модела произилази из њихове интеракције. Као што је приказано на Слици 2.1, симулације засноване на агентима могу се користити за симулације модела ниже и модела високе апстракције. Међутим, битно је назначити да ова методологија није у колизији са динамиком система или симулацијама дискретних догађаја, већ због развоја симулационих платформи, наведени симулациони приступи се користе у комбинованом мулти-методском или хибридном приступу моделирању (Vorshchev, et al., 2014). Хибридни модели који обједињују динамику система, симулације дискретних догађаја и симулације засноване на агентима, могу имати низ предности у односу на коришћење само једне методологије при изградњи симулационог модела.

2.1. Симулације засноване на ДС моделирању

Динамика система, као приступ моделирању индустријских, економских, социјалних и еколошких система, настаје 1956. године на Масачусетс Технолошком Институту (Massachusetts Institute of Technology- MIT) (Forrester, 2007). Креатор динамике система, професор Џеј Форестер (Jay Forrester), се дефинише и као један од кључних покретача компјутерске револуције 20. века, због низа пријављених патената у том периоду. Једно од суштинских достигнућа професора Форестера је било пријављивање патента за РАМ меморију, као и развој сервомеханизма за први напредни радарски систем, који је био инсталиран у Америчкој морнарици (Forrester, 1995). Након развоја првог комерцијалног дигиталног рачунара (Whirlwind digital computer), који покреће компјутерску револуцију, Форестер започиње креирање методологије за нумеричке симулације комплексних система (Lane, 2007).

Сама потреба за креирањем новог приступа за нумеричку анализу комплексних система, произилази након појаве комерцијалних компјутера, као кључног сегмента за спровођење сложених прорачуна и симулација. Са друге стране, нумерички приступ у анализи комплексних система произашао је из лимитираности статистичких метода, код временски зависних анализа, које се иначе користе у економским анализама, контроли индустријских процеса, итд. (Forrester, 1997).

Иницијални циљ симулација применом ДС модела је базиран на омогућавању анализе комплексних временски зависних проблема у индустријском менаџменту, које није могуће спровести стандардним статистичким алатима. ДС модел подразумева симулацију параметара система у временском домену кроз коришћење система нелинеарних, диференцијалних једначина првог реда и интегралних једначина. Први компјутерски језик за ДС симулације је креиран 1958. године под називом SIMPLE (Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equations) (Azab and Geddawy, 2012). Годину дана касније настаје компјутерски језик специјализован за ДС симулације DYNAMO, који постаје златни стандард за динамичке симулације у социјалним наукама у наредним деценијама.

Огроман утицај на развој ове области имају и објављене књиге Индустријска динамика (Forrester, 1997) и Пословна динамика (Sterman, 2000), као и Урбана динамика (Forrester, 1970) која дефинише коришћење нумеричких симулација за потребе урбаног планирања. Важно је назначити и публикацију Границе раста (Limits to Growth) (Meadows, et. al, 1972), која по први пут кроз коришћење комплексних динамичких модела, сагледава последице људског утицаја на глобално загревање и природне ресурсе. Ова публикација је често дефинисана као кључни фактор у креирању и покретању научних дисциплина везаних за глобално загревање и екологију (Meadows, Randers, 2012).

Динамика система као приступ моделирању има широк спектар употребе у различитим индустријама као и у различитим научним областима. Иако је настала средином 50-их година прошлог века, требало је више деценија да ова методологија постане масовно заступљена. Један од главних разлога за експоненцијални раст у употреби нумеричких симулација у индустрији, је развој перформанси компјутерских система, као и раст у броју софтверских алата за динамичке симулације.

Међутим, битно је назначити да раст примене симулационих алата пре свега произилази из самих потреба корисника, у процесу планирања и управљања. Планирање и управљање у комплексним системима, као што су компаније или логистички системи, може бити високо ризични подухват, уколико се не користе адекватни алати и методологије. Пораст комплексности у управљању, како малим компанијама, тако и корпорацијама, може се видети у смањењу просечног животног века компаније.

Средином 60-их година прошлог века, просечни животно век најуспешнијих светских компанија листираних на Стандард и Порс (Standard & Poor's) кредитном рејтингу био је 33 године. Почетком 90-их година прошлог

века, просечни животни век најуспешнијих светских компанија пада на 20 година, док је очекивани животни век до 2026. године пројектован да буде испод 14 година (Anthony, et al., 2018).

Код мањих компанија, присуство ризика који могу довести до финансијског краха компаније је значајно веће, у односу на мултинационалне компаније. Истраживања указују да присуство високо утицајних ризика код мањих производних компанија није нови феномен. У периоду између 1963. и 1982. године, од анализираних 250,000 компанија из сектора производње на територији Сједињених Америчких Држава, близу 35% анализираних компанија у првих 5 година истраживања је доживело финансијски колапс или аквизицију од стране друге компаније, док је само 20% преживело деценију (Mauboussin, et al., 2017). Када се анализира колапс операција и финансија једне компаније, битно је сагледати овај феномен и на микро нивоу, тј. на нивоу интерних грешака које доводе до пропасти ових система. На нивоу корпоративних операција могу се увидети ризици који доводе до великих губитака. Као пример се могу узети пројекти и инвестиције у информационе технологије, где степен пропасти пројекта или инвестиције као исход лошег планирања и имплементације достиже и до 70% (Daniels and La Marsh, 2007).

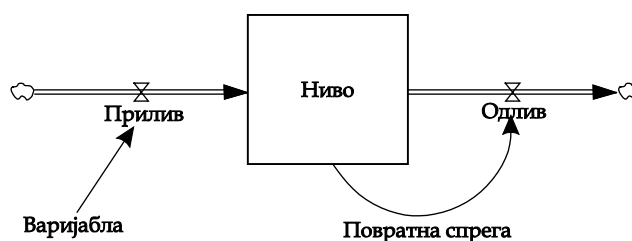
Може се истаћи да је процес планирања заснован на умањењу ризика од великих губитака, један од кључних сегмената у приступу менаџмента модерне компаније. Због тога се у многим привредним секторима планирање заснива на коришћењу алата за симулације, базираним на: динамици система, симулацијама дискретних догађаја, као и симулацијама базираним на агентима. Оно што симулације пружају су виртуална окружења за експериментисање и планирање. Битно је истаћи да планирање и прављење губитака у виртуалном окружењу, представља значајно исплативији приступ од експеримента у реалним условима (Richardson, 1999).

Динамика система има вишедеценијску употребу у планирању и оптимизацији великих и комплексних пројеката (Sternan, 1992). У пројектном менаџменту ДС има широку употребу, од планирања и оптимизације грађевинских пројеката (Han, et al., 2013) до употребе за високо ризичне пројекте у здравственом сектору (Davahli et al., 2020). Сама методологија има широку употребу и у стратешком планирању: од енергетских инвестиција и политике (Aslani, 2014), менаџменту природних ресурса (Winz et al., 2009) до планирања у јавним здравственим системима (Homer and Hirsch, 2006). ДС се може окарактерисати као јако флексибилна симулациона методологија, која се може лако ускладити према проблему који се анализира. То се може видети и у широком спектру објављених књига из употребе динамике система за различите области попут: економије (Cavana et al., 2021), симулација биолошких система (Ruth, Hannon, 1997), екологије (Ford, 1999), пословног планирања (Morecroft, 2015), финансија и банкарства (Yamaguchi, 2013), индустријског менаџмента (Sternan, 2000) итд. Са даљим развојем процеса глобализације које доноси све више прилика за пласман нових производа и услуга, произилази и пораст конкуренције као и различитих ризика. Коришћење методологија и алата за

симулације, може бити од кључног значаја у минимизацији и контроли ризика у све више конкурентном окружењу.

2.2. Основни алати ДС моделирања

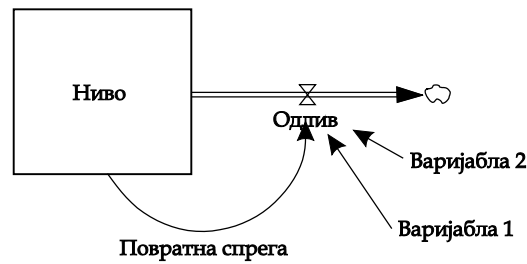
Динамика система пружа могућност моделирања било којег система који се мења током времена, уз коришћење неколико основних елемената. Сама методологија спада у категорију објектно орјентисаног моделирања и симулација. Софтверски алати за ДС симулације су већински засновани на коришћењу истих пет елемената: стопа прилива (inflow), стопа одлива (outflow), ниво (stock), повратних петљи (feedback loop) и варијабла или константа (variable/constant). На Слици 2.2. представљен је графички приказ пет основних елемената за моделирање у динамици система.



Слика 2.2 Пет основних елемената ДС моделирања

Ови елементи омогућавају laku визуелизацију структуре анализираниог система. Такав приступ омогућава једноставну инспекцију интегритета структуре, пре преласка на дефинисање формула или програмирање компонената модела. Оно што основни ДС алати омогућавају је и лако разумевање смера у којем се нумерички прорачун одвија. У случају дефинисаном на Слици 2.2, прилив може омогућити кретање информација искључиво у смеру нивоа, док одлив функционише у супротном смеру. Такође, моделирана повратна петља регулише динамичко понашање одлива, према променама вредности у нивоу. Визуелни сегмент који овде игра важну улогу је стрелица. Наиме, код ове врсте моделирања, стрелица из варијабле А ка варијабли Б математички дефинише варијаблу Б. Концепт се може боље видети на Слици 2.3. Стрелице или повратне петље у процесу ДС моделирања искључиво дефинишу узрочност или каузалност, док код неких других видова моделирања или квалитативних модела, стрелица може дефинисати корелацију између две варијабле.

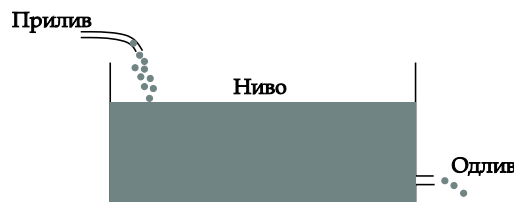
На Слици 2.3 је представљена једноставна ДС структура, где је стопа одлива моделирана кроз употребу три вредности, и то: Ниво, Варијабла 1 и Варијабла 2. Одлив у приказаном моделу директно зависи од промене стања у Нивоу, као и од вредности Варијабле 1 и Варијабле 2. Дакле, вредности приказане на претходним сликама су функције времена.



Слика 2.3 Каузалност у ДС моделима

Као што је приказано на Слици 2.2 и Слици 2.3, ДС модели због свог интуитивног приступа моделирању омогућавају једноставну визуализацију и инспекцију комплексних структурних модела. Могућност лаке визуализације структуре модела, је од кључног значаја у процесу дизајна и развоја симулација (Novmand, 2014). Такође и сам процес учења кроз интерактивне симулационе моделе је значајно једноставнији у условима у којима сви корисници разумеју структуру модела који генерише симулацију (Реск, 1998).

Слика 2.4 приказује принцип на којој је заснована основна структура, тј., елемент ДС моделирања. Временске функције: нивоа $S(t)$, стопе прилива $P(t)$ и стопе одлива $O(t)$ могу бити дефинисане кроз приказ једноставног хидрауличког система, као што је случај са приливом и одливом течности (Слика 2.4). Равнотежа основне структуре елемента у ДС моделирању се може исказати кроз интегралну (2.1) или диференцијалну једначину (2.2).



Слика 2.4 Математичко дефинисање основне структуре у ДС моделирању (Sterman, 2000)

Интегрални облик функције нивоа параметра система:

$$S(t) = \int_{t_0}^t [P(t) - O(t)] dt + S(t_0). \quad (2.1)$$

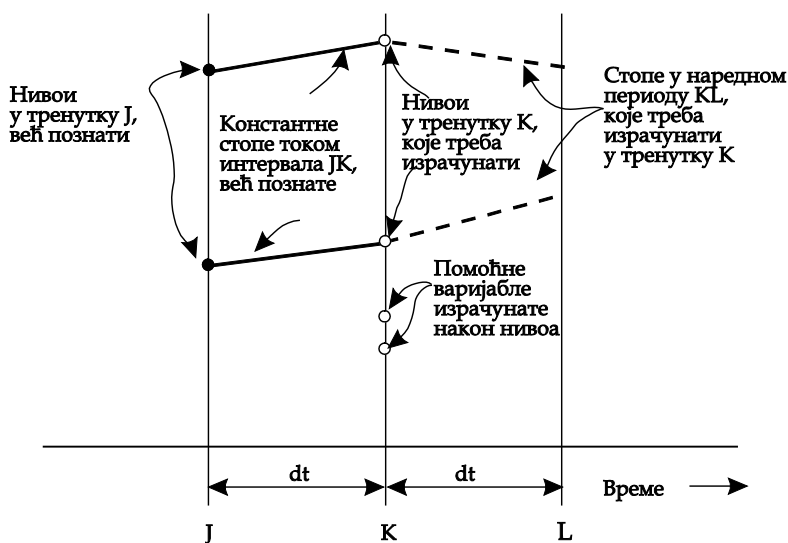
Диференцијални облик једначине нивоа параметра система:

$$dS(t)/dt = P(t) - O(t). \quad (2.2)$$

Дакле, у складу са Сликаом 2.4, може се рећи да ниво посматраног материјалног параметра функционише попут резервоара (Sterman, 2000). Вредност нивоа искључиво се мења у зависности од промена које настају у стопи прилива и одлива параметра система. Функција нивоа $S(t)$ параметра M система може представљати различите вредности попут: новца, људи, производа, енергената итд. Стопе прилива и одлива анализираних параметра M система се дефинишу у изабраној јединици времена: \$/месецу, људи/години, производ/дан итд.

Треба нагласити да у ДС симулацијама постоје две групе моделирања (Златановић, 2012): функција нивоа $S(t)$ и функција стопа ($P(t)$, $O(t)$). Једначине нивоа показују како се одређују нивои у неком временском тренутку $t=K$, а на основу вредности из временског интервала $[J, K]$ (Слика 2.5).

Диференцијалне једначине нивоа, које се формирају у ДС симулацијама, су независне једна од друге, а зависе само од информација из тренутка $t=K$. Функције стопе прилива $P(t)$ и одлива $O(t)$ се дефинишу у садашњем временском тренутку, и њихове међусобне интеракције су независне. Али, треба нагласити да њихове интеракције директно утичу на функцију нивоа $S(t)$ параметра система. Када се ниво израчуна за тренутак K и стопа за интервал $[K, L]$ време се индексира и помера за један интервал надесно (Слика 2.5).



Слика 2.5 Израчунавање вредности функције нивоа у временском тренутку K (Златановић, 2012)

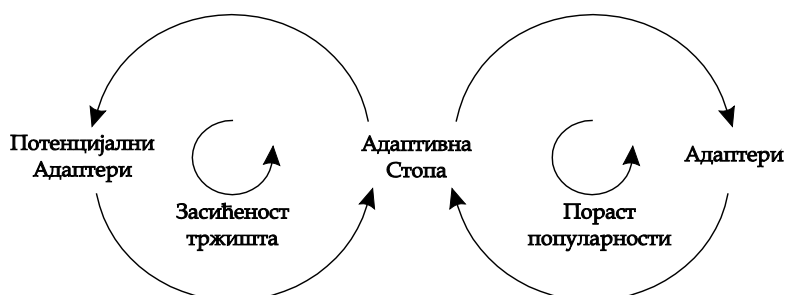
Слика 2.5 суштински илуструје узводну шему коначних разлика по којој се израчунавају дискретне вредности функција нивоа и стопа у временским тренуцима дефинисаним изабраним временским инкрементом dt . За дефинисање вредности нивоа $S(t)$ у временском тренутку $t=K$, неопходно је познавање вредности нивоа $S(t)$ из временског тренутка $t=J$ и вредности стопа прилива $P(t)$ и одлива $O(t)$ из временског интервала $dt=[J, K]$.

2.2.1. Ефекат каузалности дефинисан преко повратних (feedback) петљи

Посебна пажња треба да се посвети постојању и моделирању интеракција, унутар комплексних система између његових елемената. Интеракције између елемената система уобичајено се моделирају применом дијаграма каузалне петље (causal loop diagrams). Дијаграми каузалне петље су једноставни алати који омогућавају кориснику да генерише слику кључних компоненти система, са приказом најутицајнијих интеракција. Ознаке на дијаграму су јасне и

интуитивне. Интерактивна веза репрезентована је стрелицом, сама стрелица је усмерена ка кретању информација или материјала. Поред стрелице се поставља знак интеракције који може бити + или -. Петље се креирају сагласно утицајем параметара једног на други, унутар елемента структуре. Утицаји могу бити ојачавајући (*R* reinforcing или + позитивни) или балансирајући (*B* balancing тј. - негативни).

Ове петље се још називају повратним спрегама, дијаграмима каузалне петље или фидбек (feedback) петљама. Контрола вредности унутар елемента система врши се преко растућег или опадајућег ефекта у зависности од потреба. На Слици 2.6 приказана је шема дијаграма са повратном петљом (Meadows, 2012).



Слика 2.6 Дијаграм повратне(feedback) петље (Meadows, 2012)

Дијаграм повратне петље илуструје позитивну интеракцију (повезаност) која иде од Адаптивне стопе A_r (Adaption rate) до Адаптера A (Adopters). Интеракција се спроводи тако да је зависно променљива A позитивно растућа при промени независно променљиве A_r .

Са друге стране, дата је негативна каузална веза од Адаптивне стопе A_r до Потенцијалних адаптера P_a (Potential adopters). У овом случају, зависно променљива P_a се инверзно/обрнуто пропорционално мења са променом променљиве A_r . Дијаграми каузалне петље су изузетно корисни, јер се њихова структура високог нивоа лако описује у оквиру ДС моделирања.

Дакле, једана од структурних карактеристика која дефинише систем да је комплексан, је постојање повратних петљи унутар његове структуре (Ladyman, et al., 2013). Повратне петље омогућавају комуницирање између различитих делова система, што поспешује даљу адаптацију система према дефинисаном циљу. Дакле, у ДС симулацијама повратне петље могу бити главни генератор нелинеарности и ниске предвидљивости система. Најзначајније промене стања за анализу, у динамичком понашању комплексног система, генерисане су утицајем повратних петљи система.

2.2.2 Временско кашњење I реда

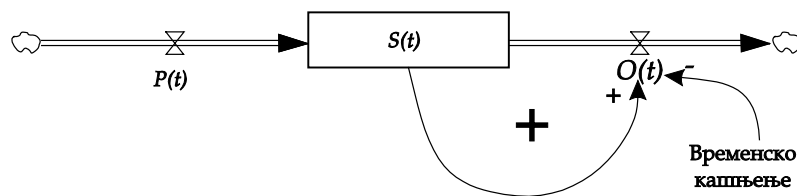
Стопе прилива $P(t)$ и одлива $O(t)$ параметра система не морају да имају исту временску законитост, а самим тим, због постојања њихове разлике успоставља се одређени ниво параметра система. Уобичајена терминологија у ДС моделирању је да разлика у процесима прилива и одлива представља

кашњење. Сама вредност кашњења може бити задата као: константна, линеарна, нелинеарна функција времена, итд. Релација (2.3) приказује зависност између функција стопе прилива $P(t)$ и стопе одлива $O(t)$ са константном вредношћу временског кашњења D :

$$P(t) = O(t-D) \quad (2.3)$$

где је: $P(t)$ временска функција прилива материјалног параметра M , $O(t-D)$ временска функција одлива материјалног параметра.

На Слици 2.7 приказана је шема ДС моделирања функције нивоа $S(t)$ материјалног параметра M заснована на временском кашњењу I реда између стопа прилива и одлива.



Слика 2.7 ДС модел $S(t)$ функције нивоа у случају временског кашњења I реда између стопа прилива $P(t)$ и одлива $O(t)$

Уколико је D средње време кашњења, временска функција $O(t)$ се може изразити преко функције нивоа $S(t)$ у следећем облику:

$$O(t) = \frac{S(t)}{D}, \quad (2.4)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{S(t)}{D} \quad (2.5)$$

тако да се решење хомогене диференцијалне једначине:

$$\frac{dS(t)}{dt} - \frac{S(t)}{D} = 0, \quad (2.6)$$

може написати у облику:

$$S(t) = S_0 e^{t/D} \quad (2.7)$$

где је S_0 почетна вредност функције нивоа.

Треба нагласити, да се процес ДС моделирања функције нивоа $S(t)$, за случај да је $D = \text{const}$, назива материјалним кашњењем I реда јер се добија решавањем хомогене диференцијалне једначине I реда. Дакле, у случају константне вредности временског кашњења између стопе прилива и одлива јавља се експоненцијални раст нивоа $S(t)$ (релација 2.7).

2.2.3 Временско кашњење вишег реда

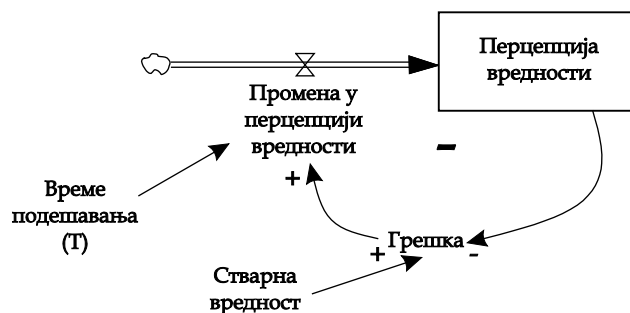
Осим константне вредности временског кашњења између стопе прилива и одлива, често се код комплексних система појављују временска кашњења вишег реда, која могу бити репрезентована као n временских кашњења I реда (Choорјcharoen and Magzar, 2012). Уколико се претпостави да је средње време D за сваки интервал кашњења исто, онда је временско кашњење вишег реда еквивалентно Erlang-овој расподели n -тог реда, која се може приказати следећом релацијом (Choорјcharoen and Magzar, 2012):

$$S(t) = \frac{\left(\frac{n}{D}\right)^n}{(n-1)!} t^{n-1} e^{-\frac{n}{D}t} \quad (2.8)$$

Треба нагласити да је претходна релација специјалан случај временског кашњења вишег реда који се може јавити код комплексних система. У циљу решавања опште форме временског кашњења вишег реда, неопходно је решавати систем диференцијалних једначина. Хомогено решење диференцијалне једначине суштински одговара интерној структури која проузрокује кашњење. Временско кашњење између стопе прилива и одлива суштински проузрокују временску променљивост, тј., динамику проучаваног система. Један од облика кашњења који се може узети у обзир у ДС симулацијама социјалних проблема је хумани одговор који се још назива информационо кашњење (Choорјcharoen and Magzar, 2012).

2.2.4 Информационо кашњење

Осим кашњења системских варијабли материјалног типа, у оквиру ДС симулација могуће је моделирање информационог кашњења. Овај облик временског кашњења је заснован на кашњењу у људској перцепцији и симулира се преко информационог фидбека. За разлику од кашњења код материјалних системских варијабли, информационо кашњење се не може симулирати преко протока физичког типа. Треба нагласити да моделирање неког система са појавом информационог кашњења захтева различите приступе који дају могућност анализе психолошких процеса људског мозга. На Слици 2.8 дат је модел информационог кашњења који се може развити у ДС симулацијама.



Слика 2.8 ДС модел за симулацију информационог кашњења

Постоји могућност да особа направи неки облик временског кашњења током интерпретације или перцепције неке информације, која се огледа кроз време прилагођавања. Очекивано време перцепције уобичајено узима у обзир неко кашњење које се додаје на њену актуелну вредност. Један од многих разлога за кашњење у перцепцији је тешкоћа у разликовању између промене улазне информације (инпута) и буке (ометања) у самом систему. Стога се може пропорционално променити очекивана вредност инпута као последица настале грешке, која је, суштински, разлика између актуелне и очекиване вредности:

$$\Delta S = \hat{S} - S \quad (2.9)$$

где је: ΔS грешка, \hat{S} актуелна вредност инпута, S очекивана вредност.

Брзина промене у инпуту је директно пропорционална грешци, и дефинише се применом следеће релације:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Delta S}{\tau} = \frac{\hat{S} - S}{\tau} \quad (2.10)$$

dS/dt означава прилив очекиване вредности, док τ представља време прилагођавања. За разматрану функцију актуелне варијабле, функција очекиване вредности може се добити решавањем претходне диференцијалне једначине. У пракси се, најчешће, при ДС симулацијама, јавља случај да за постављен диференцијални услов равнотеже не постоји аналитичко решење, стога се при решавању прибегава примени нумеричких метода.

2.2.5 Нумеричке методе у ДС симулацијама

Код више комплексних система, тј., већ код система које у себи садрже повратне петље, углавном не постоји аналитичко решење равнотежних диференцијалних једначина. У том случају се у оквиру компјутерских симулација прибегава примени нумеричких метода (Choopojcharoen and Magzar, 2012). Ова решења су углавном апроксимативна заснована на итеративним процесима, са вишим или нижим нивоом тачности, што у великој мери зависи од величине изабраног временског корака. У ДС симулацијама нумеричко решавање математичког модела засновано је на Ојлеровој (Euler's) или Рунге-Куттовој (Runge-Kutta) методи II реда.

Нека елемент система код ДС симулације садржи повратну петљу. У том случају Нето струјање (*Net Flow*), тј., тренутна промена нивоа dS/dt зависи од претходне вредности нивоа $S(t)$:

$$\frac{dS}{dt} = f(S, t) \quad (2.11)$$

где је: $S(t)$ - вредност нивоа у временском тренутку t , $f(S, t)$ - функција зависности тренутне промене нивоа од S и t .

Усвајањем малог временског корака $\Delta t = t_k - t_0$, претходна диференцијална једначина се своди на облик:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{S_k - S_0}{t_k - t_0} = f(S_0, t_0) \quad (2.12)$$

где је S_k непозната вредност која одговара временском тренутку t_k , док је S_0 вредност која одговара почетном временском тренутку t_0 .

Суштински решење у неком временском тренутку t_i дефинише се преко решења из претходног временског тренутка t_{i-1} :

$$S_i = S_{i-1} + f(S_{i-1}, t_{i-1})\Delta t \quad (2.13)$$

где је $t_i = t_{i-1} + \Delta t$. Ојлерова метода, заснована на примени претходне релације, захтева избор довољно малог временског корака Δt да би решење било задовољавајуће тачности.

У Ојлеровој методи нагиб функције $f(t)$ у основи је једнак изводу у почетном тренутку временског интервала Δt . Код Рунге-Кутове методе, нагиб (2.11) функције $f(t)$ представља средњу вредност извода у почетном тренутку t_0 и следећем тренутку t_1 временског интервала Δt .

Нека је са S_1 означена вредност нивоа у следећем временском тренутку t_1 тј., на крају временског интервала Δt , применом методе Рунге-Кута II реда ова вредност се дефинише следећом релацијом:

$$S_1 = S_0 + \frac{f(S_0 + k_1\Delta t, t_0 + \Delta t) - f(S_0, t_0)}{2}\Delta t \quad (2.14)$$

где је са k_1 означен нагиб криве у почетном временском тренутку t_0 временског интервала Δt :

$$k_1 = \left(\frac{dS}{dt}\right)_{t_0} = f(S_0, t_0) \quad (2.15)$$

2.3. Моделирање и симулације различитих комплексних система

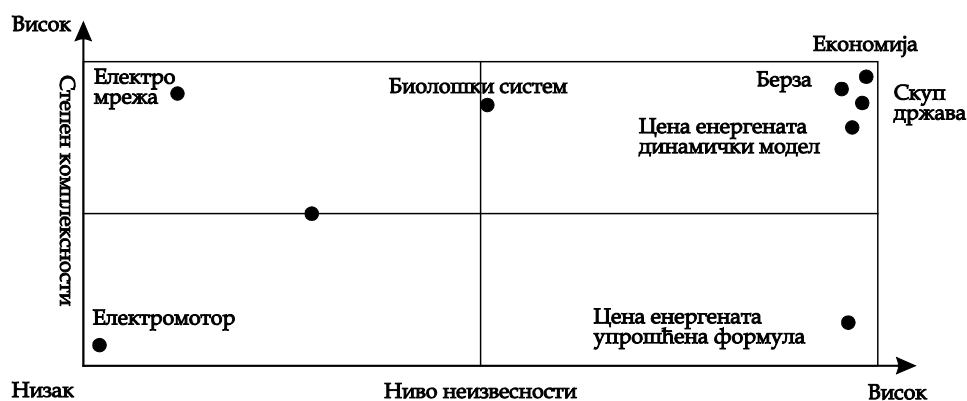
Дефинисање симулационог модела система подразумева формирање скупа временски повезаних елемената, који функционишу са дефинисаним циљем (Serman, 2000). Едвард Деминг, креатор модерног менаџмента, дефинише систем као мрежу елемената или подсистема, које обједињује функционисање ка остваривању одређеног циља (León, 2008).

Под комплексним системима могу се сматрати сви системи које дефинише висок степен неизвесности, нелинеарност процеса унутар њих, велики број интерконекција између сегмената система, као и присуство повратних петљи.

Комплексни системи по својој структури уз висок степен нелинеарности, могу имати висок степене стохастичког понашања.

Као макро комплексан систем могу се дефинисати: еколошки, економски системи или држава. Као пример микро комплексног система може се сагледати предузеће, логистички систем или тим људи. Сви наведени примери комплексних система се могу дефинисати као системи високе апстракције и ниске предвидљивости.

Постојање повратних (фидбек) петљи је један од главних генератора нелинеарности и ниске предвидљивости динамичког понашања система. Сложени системи, попут берзе или компаније, су у континуалном стању адаптације. Ови системи се дефинишу као комплексни адаптивни системи (complex adaptive systems). Биолошки системи попут људског тела, такође се посматрају као комплексни адаптивни системи, који се под утицајем интерних промена или екстерних стресора, континуално налазе у некој фази адаптације. Слика 2.9 приказује различите врсте система који се могу математички моделирати, као и њихову расподелу по степену комплексности и степену неизвесности.



Слика 2.9 Различите врсте система и њихова расподела по степену комплексности и неизвесности

Као што је већ раније наглашено, постоји више типова комплексних система, који се могу поделити по степену комплексности, неизвесности, апстракције, итд. Социјални системи представљају најкомплексније системе за предикцију, као и за моделирање. Код социјалних система поред технолошких и материјалних компонената, људски фактор игра кључну улогу. Компанија, логистички систем или производна линија, без људског фактора представљају само скуп механизације и технологије. Социјални системи, као што је приказано на Слици 2.9, могу се сагледавати и по комплексности као и по степену неизвесности. Електро мрежа може бити дефинисана као високо комплексан систем, са великим бројем интерконекованих подсистема. Међутим, понашање електро мреже се може симулирати и предвидети са високим степеном прецизности, у случају да се подсистеми адекватно одржавају. Док са друге стране спектра високе комплексности, системи попут: економија, финансијских тржишта, кластера региона и држава или цена енергената, представља високо

комплексан систем дефинисан са потенцијалом за велике варијације и ниским степеном предикције (Makridakis and Taleb, 2009).

У складу са Сликаом 2.10, може се закључити да динамика система има другачији приступ при анализирању или при оптимизацији комплексних система. Стандардни приступи анализирања и решавања проблема везаних за системе различитих апстракција, могу се дефинисати у три кључна корака: прикупљању података, анализи података и интеграцији добијених резултата у доменски специфичне формуле. Доменски специјализоване формуле могу бити: упрошћене формуле за анализу ризика, формуле за оптимизацију одређене врсте система, или било који прорачунски приступи специјализовани за проналажење оптималног решења за дефинисану врсту проблема.

Динамички приступ заснован на креирању ДС модела, приказан на десној стани Сlike 2.10, предлаже другачији приступ, у односу на конвенционално прикупљање података и адаптацију тих података према линеарним аналитичким алатима. Приликом креирања модела заснованог на динамици система први кораци су сконцентрисани на квалитативним или меким методама (Forrester, 1994). У првим корацима врши се концептуализација проблема који се решава, као и коришћење дијаграма каузалне петље (causal loop diagrams). Кроз наведене кораке првобитно креирање модела се фокусира на разумевању динамичке структуре система и прикупљању података према потреби модела који најбоље дефинише тренутно стање. Након тога креира се ДС модел који пролази кроз процесе валидације, и у задњој фази добијају се генерисани резултати (Barlas, 1996).



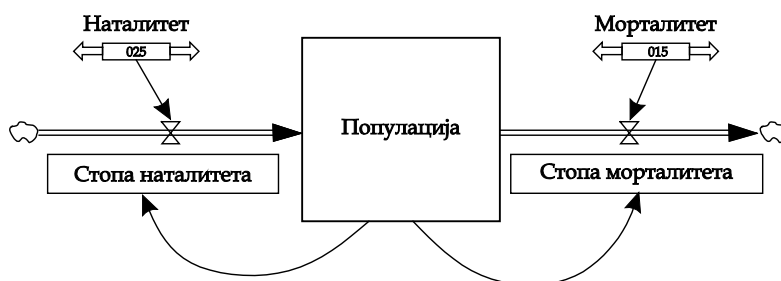
Слика 2.10 Стандардни приступ (лево) и динамички приступ (десно)

Као што је приказано на Слици 2.10, овај приступ има два смера. То указује да се приликом анализирања система кроз симулациони модел, може закључити

да модел лоше осликава реално стање система, или је сам систем, у међувремену, доживео значајне промене. У том случају процес моделирања се враћа на првобитне кораке и врши се даља адаптација модела, што није могуће у случају коришћења доменских формула и аналитичких алата.

Једна од кључних предности код ДС симулационих модела је лако разумевање структуре модела за кориснике или стејкхолдере који нису упознати са унутрашњом структуром овог приступа. Разумевање структуре од стране стејкхолдера, такође, може омогућити да се креирање модела спроводи кроз континуални процес итерација ка оптималном решењу.

Један од кључних сегмената динамичког приступа, приказаног на Слици 2.10, је корак у којем модел добија форму кроз коришћење нивоа, прилива и одлива. Интуитивна структура модела креираних динамиком система омогућава да високо апстрактни концепти попут популационих модела (Слика 2.11) буду лако разумљиви корисницима и стејкхолдерима.

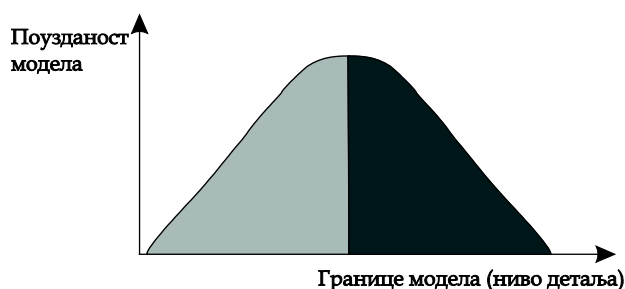


Слика 2.11 Упрошћени динамички модел популације

Упрошћени популациони модел са Слике 2.11, приказује смањење или повећање популације одређеног система. Прилив (Стопа наталитета) и одлив (Стопа морталитета) у моделу су дефинисани кроз фиксне вредности: наталитет (вредности 2.5%) и морталитет (вредности 1.5%). Као што је приказано на Слици 2.11, ниво популације је у експоненцијалном расту, међутим сам модел због своје упрошћене форме није оптималан за практичну употребу. Сама структура упрошћеног динамичког модела популације има изузетно уску моделску границу (model boundary). У претходно дефинисаном примеру проширење границе модела, тј. које варијабле и вредности модел треба да садржи, може бити од изузетног значаја за његову поузданост. Такође, креирање симулације са изузетно широким границама модела може бити контра продуктивно и изазвати нагли пад у поузданости модела (Слика 2.12).

Одређивање шта треба изузети из модела, носи подједнаку важност са одлуком шта модел треба да обухвата, овај део процеса креирања модела треба итеративно разрадити у динамичком приступу развоја симулације (Слика 2.10). Иако Слика 2.12, која дефинише нагли пад поузданости модела након одређеног повећања његових граница, не мора да буде егзактно тачна, јер приликом повећања величине модела, постоји доста простора где величина модела може да расте без наглог пада његове поузданости (Robinson, 2008). Сходно томе, универзално прихваћен приступ у развоју модела, је креирање што

једноставнијег симулационог решења које задовољава потребе циљева истраживања, и након тога по потреби и могућностима даље проширивати модел (Robinson et al. 2010).



Слика 2.12 Однос поузданости модела и његове величине (Lobão and Porto, 1997)

У научном менаџменту (scientific management), стандардни приступ коришћења динамике система или других симулационих методологија, је сконцентрисан на симулирању одређеног дела компаније: попут производне линије, залиха или симулирања одређене менаџерске иницијативе или проблема који се решава (Snabe and Größler, 2006; Shafiei et al., 2015) са циљем дефинисања оптималних граница модела (Trimble, 2014). Сходно томе, може се рећи да динамика система фундаментално није методологија која је намењена за моделирање и симулације “целокупних система и свих њихових елемената” попут моделирања: целокупне економије, индустрије или компаније, већ фокус ове методологије лежи у моделирању одређеног проблема који се решава. Наравно, ДС модели симулирају динамичко понашање економије, индустрије или компаније, као целине али треба истаћи да је велики број елемената изостављен. У супротном, модели би потенцијално садржали десетине хиљада варијабли и милионе интерконекција.

Једна од битних предности приликом моделирања одређеног проблема, насупротив покушају моделирања целокупног система и свих његових елемената, је и једноставније дефинисање граница самог модела. Решење за боље дефинисање циљева симулације и њених граница је и коришћење квалитативних алата и дијаграма за дефинисање моделских граница. Ови приступи могу омогућити избацивање непотребне комплексности из модела, која може проузроковати непоузданост у генерисаним симулацијама (Moyano and Richardson, 2013; Cihák, 2007).

Оно што симулационе методологије динамике система пружају је могућност лаког моделирања и стицања знања о неком комплексном систему. Разумевање динамичке структуре неког система, попут тога како су његови сегменти повезани и које повратне петље су потенцијално присутне, може бити од велике користи при доношењу одлука (Diehl and Sterman, 1995). У случају анализирања неизвесних социјалних система, симулације пружају могућност ефикасног доношења одлука кроз стицање знања о динамичком понашању система.

3. LEAN МЕТОДОЛОГИЈА

LEAN методологија представља приступ континуалног унапређења производних и пословних процеса. Време настанка LEAN методологије датира у периоду 50-их година 20. века. Овај приступ управљању је директан производ Тојота корпорације, и њене жеље за континуалним побољшањем свих сегмената како производних, тако и корпоративних операција. Првобитни назив ове методологије био је Тојота производни систем (ТПС), који се и данас често користи, преваходно у ауто индустрији. Међутим, због саме еволуције ове методологије и њених оквира изван ауто индустрије, 90-их година прошлог века назив LEAN уоквирује ТПС и остале алате под један назив. Иницијални циљ ове методологије био је да се омогући јапанским компанијама да буду конкурентније на светском тржишту, преваходно према интернационалним корпорацијама и производним гигантима из Сједињених Америчких Држава. Сходно томе, методологија заснована на максимизацији и креирању вредности из постојећих ресурса, као и константној елиминацији вишка, била је природна прогресија за ослабљену јапанску индустрију.

Историјски, највећа забележена тржишна доминација америчких компанија у ауто и електронској индустрији постепено нестаје као последица масовне имплементације LEAN методологије у Јапану (Roos and Womack, 1991). Импресионирани изузетним растом Јапанске индустрије у релативно кратком периоду, научници из западних земаља, крајем 80-их година прошлог века, почињу да изучавају LEAN принципе и дефинишу стратегије имплементације ове методологије у западним индустријским системима (Liker, 2004). Један од основних приступа у дефинисању да је неки систем достигао LEAN статус, је да је формиран систем који континуално тежи да генерише све више вредности, са што мање ангажованих ресурса. Такође, при дефинисању да ли је неки производни или корпоративни систем LEAN, битно је и напоменути остваривање систематске и континуалне елиминације вишка унутар система (Hampson, 1999).

Више од 50 година након настанка LEAN-а, принципи и концепти ове методологије се сагледавају као научно потврђен приступ ка унапређењу продуктивности свих система који су засновани на постојању процеса у њиховим пословним операцијама (Bortolotti, et al., 2015).

3.1. LEAN теоријски аспекти и алати

Приликом дефинисања LEAN методологије, битно је напоменути да концепти и теорија ове методологије произилази из Тојота корпорације, и њене производне ТПС (Тојота производни систем) методологије (Baluch, et al., 2012). Иако LEAN методологија у 21. веку обухвата значајно више алата од иницијалне ТПС методологије, првобитни LEAN концепти су у потпуности били засновани на приступу креираном у Тојота корпорацији. LEAN се 1992. године у књизи „Машина која је променила свет“, први пут појављује као термин за елиминацију вишка и континуално унапређење производних система (Маџић и Ђаран, 2016).

И као такав, LEAN постаје назив за теорију и алате који обухватају како фундаменталне ТПС концепте, тако и новонастале алате за оптимизацију процеса и комуникацију између људи.

Тојотин производни систем базира своју филозофију на три Јапанска термина: *Muri* (преоптерећење), *Mura* (несталност) и *Muda* (вишак). Тојотин систем, као и LEAN, предлажу дизајн производних процеса, који у својој структури заобилазе потребу за преоптерећењем ("Мури") производних ресурса и људи. Преоптерећени ресурси како људских тако и технолошки, могу проузроковати несталност ("Мура"), проблеме у контроли квалитета као и нежељену варијабилност процеса, што доводи до задњег корака у Тојотином систему, а то је континуална елиминација вишка. Стратегија елиминације вишка, сагледавана је као процес који нема дефинисан крај, из разлога што у филозофији LEAN-а и ТПС-а, вишак је присутан у сваком нивоу развоја компаније. Такође, битно је назначити да процесни вишак треба сагледавати као феномен који може да се појави приликом било којих промена унутар компаније: промена производног програма, развој новог производа, додавање производних капацитета и слично.

LEAN и ТПС дефинишу осам врста процесног вишка који може бити присутан унутар компаније или производног система: транспорт, залихе, чекање, дефекти, непотребни покрети (машина или људи), прекомерна производња, прекомерно процесирање и неискоришћеност талента (Ahmed and Chowdhury, 2018). Неки од наведених процесних вишкова се могу дефинисати као константне вредности, које је могуће предвидети и стабилизovati. У ову категорију могу се сврстати: залихе, неискоришћеност талента, прекомерни покрети, чекање, дефекти и прекомерна производња. Са друге стране, транспорт и прекомерно процесирање могу бити екстерни и варијабилни феномени, који у многим случајевима могу бити диктирани од стране корисника или других учесника у дистрибутивном ланцу.

Један од начина на који LEAN предлаже контролу над процесним вишком, попут залиха као и прекомерне производње, је кроз коришћење принципа *Just in time* (JIT) и *Pull* производње (Sugimori, Kusunoki and Cho, 1977). JIT дефинише производни програм који производи само количине производа који су тренутно тражени и у количини која је тражена од стране корисника. Овај принцип је супротан од производње резервних залиха готовог производа или полуфабриката, које имају за циљ да омогуће компанијама брзо реаговање на флукуације у тржишној потражњи. Принцип *Pull* (вући) производње дефинише да целокупни производни систем мора избегавати прекомерну производњу и пласман производа на тржиште који није усклађен са потражњом, тј. тржишна потражња "вуче" степен производње. Супротно од овог принципа је *Push* систем, где компанија "гура" своје производе на тржиште. Битно је истаћи да су *Push* системи значајно присутнији од *Pull* система, из разлога што компаније у краћем временском року могу имати користи од "гурања" својих производа низ дистрибутивне ланце иако адекватна потражња није присутна (Daine, Winnington and Head, 2011).

Међутим, очекивано је да након одређеног времена дистрибутери или други агенти у дистрибутивној мрежи, укину набавку или смање набавну количину од произвођача, након слабог пласмана тог производа на тржишту. Сходно томе, прекомерна производња која није усклађена са потребама тржишта може донети велике губитке, како произвођачу, тако и дистрибутеру.

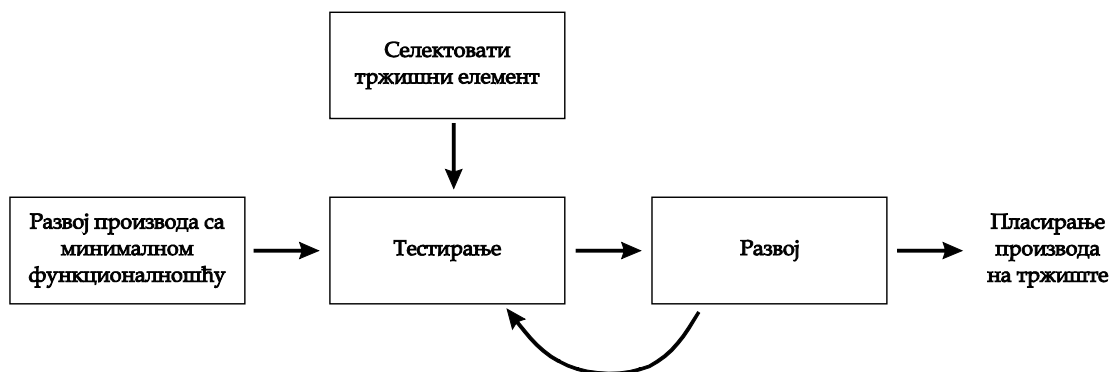
LEAN системи, производни и услужни, базирају своје функционисање да са што мање ангажовања капитала и осталих ресурса генеришу што више вредности кориснику. Централни концепт имплементације LEAN методологије унутар компаније је базиран на елиминацији 8 врста вишка, као и коришћење LEAN алата попут: Канбан табли, Андон система, А3 мапирања, PDCA (Plan Do Check Act), Гемба (Gemba) приступа и других.

3.2. LEAN старт-ап

Поред успостављених принципа за оптимизацију процеса, LEAN методологија у свом алату садржи и нове приступе за минимизацију ризика при развоју нових производа или услуга. Ови приступи су превасходно намењени за високо технолошка старт-ап предузећа, међутим могу се користити и код малих и средњих предузећа, као и код корпорација, које желе да пласирају нове производе на тржиште. Стратегија развоја производа или услуга са високом неизвесношћу, представља један од најизазовнијих и најризичнијих подухвата са којим се суочава једна компанија. Под производом или услугом високе неизвесности може се сврстати било који производ или услуга који се пласира на тржиште, где компанија која их пласира нема претходна искуства са њеним развојем и усклађивањем са потребама тржишта.

Приступ под називом “LEAN старт-ап” представља скуп алата за усклађивање производа са потребама корисника кроз низ планираних итерација (мањих промена) карактеристика производа (Bortolini, et al., 2018). Под овим приступом производ пролази кроз развојне циклусе, које су диктирани од стране корисника. LEAN старт-ап се показао као изузетан приступ у развоју дигиталних као и физичких производа, који се могу дефинисати као иновација на тржишту (Eisenmann, 2012). LEAN старт-ап у својој основи има LEAN принцип заснован на генерисању што веће вредности са што мање ангажованих материјалних и људских ресурса. У овом случају LEAN старт-ап предлаже коришћење методологије дизајна и имплементације “производа са минималном функционалношћу” (Minimal Viable Product).

Производ минималне функционалности (ПМФ) представља упрошћену варијанту производа или услуге, који се налази у раним фазама развоја или још увек није пласиран на тржиште (Lenarduzzi and Taibi, 2016). Након дизајна ПМФ-а и његовог ограниченог пласмана на тржиште, компанија је у могућности да увиди потенцијалне недостатке везане за тај производ. Након тога кроз даљи континуални процес тестирања, производ се може ускладити са стварним потребама тржишта (Ries, 2009), као што је приказано на Слици 3.1.



Слика 3.1 Процес имплементације LEAN старт-ап методе

LEAN старт-ап процес, приказан на Слици 3.1, дефинише да је развој производа, након тестирања код ограниченог тржишног сегмента, циркуларног карактера. То указује на неизвесност у броју итерација кроз које упрошћена верзија датог производа треба да прође, пре него што је пласирана на тржиште.

Основа овог концепта лежи у избегавању превеликог иницијалног инвестирања у развој производа који је високо ризичан и фундаментално неизвестан у својој егзистенцији на тржишту. Предлог приступа је да, кроз дефинисан експериментални процес, компанија може доћи до решења у којој конфигурацији тај производ треба развијати, као и да ли је тај производ или услугу уопште потребно пласирати на тржиште. Процентуални неуспех новопласираних услуга и производа на тржишту у многим старт-ап индустријама достиже и до 90%, што указује на велике ризике при процени потреба тржишта као и у потенцијалним потешкоћама у имплементацији нових технологија (Jovičić, et. al., 2019).

3.3. Теорија ограничења

Теорија ограничења (ТО) представља приступ унапређењу продуктивности компанија, кроз идентификацију и сузбијање ефекта уских грла које ограничавају оптимално функционисање анализираних система. Сама методологија није ограничена на производне и логистичке системе, већ покрива све економске секторе, као и социјалне системе који своје функционисање заснивају на процесу (Rahman, 1998). Теорија ограничења је настала 80-их година прошлог века, првобитно у форми софтверског решења за планирање и оптимизације у производним системима. Софтверски алат је био заснован на принципима механике флуида, и сагледавао је сваки производни погон као систем који у себи има макар једно уско грло, које ограничава функционисање целокупног система (Spencer and Cox, 1995). Међутим, након постизања изузетних резултата у производном сектору, овај концепт улази у процес еволуције где постаје универзално примењена теорија за оптимизацију процеса и пројеката (Watson, 2007).

Методологија је фокусирана на идентификацији и унапређењу перформанси “главног уског грла”, које представља главни ограничавајући

фактор целокупног система ка постизању одређеног циља. Теорија ограничења налаже да сваку компанију, институцију, болницу или логистички ланац, треба сагледавати као систем који функционише ка дефинисаном циљу. Долажење до закључка шта је главни циљ у функционисању анализираних система, представља први и кључни корак у теорији ограничења. Битно је назначити да по ТО, сваки систем који тежи ка већем степену ефикасности или остваривања дефинисаних циљева, у себи садржи једно уско грло које дефинише степен продуктивности целокупног система.

Према теорији ограничења, један радни сат који је изгубљен на уском грлу, је радни сат рада који је целокупни систем изгубио, док време изгубљено на сегментима система који нису ограничење може бити надокнађено. Сходно томе, остваривање већег степена продуктивности и скраћивања времена процесирања изван уског грла, неће генерисати пораст продуктивности за цео систем. Из тога се може закључити да је теорија ограничења, преваходно, фокусирана на унапређење и балансирање протока (материјала или информација), а не на балансирања капацитета (Andelkovic, et al., 2013).

Претпоставка о унапређењу само једног дела система је у супротности са LEAN филозофијом, која предлаже унапређење целокупног система тј. сваког сегмента система, без обзира да ли је тај сегмент уско грло или високо продуктивна радна ћелија. LEAN предлаже овај приступ из разлога што је један од кључних циљева LEAN-а, као и ТПС методологије, креирање организационе културе засноване на континуалном унапређењу код сваког запосленог, и у свим деловима предузећа. Такође, приликом имплементације теорије ограничења, постоји могућност лоше процене у дефинисању шта је главно уско грло анализираних система, што може узроковати да се развојна иницијатива или капитална инвестиција усмере ка унапређењу погрешног процеса.

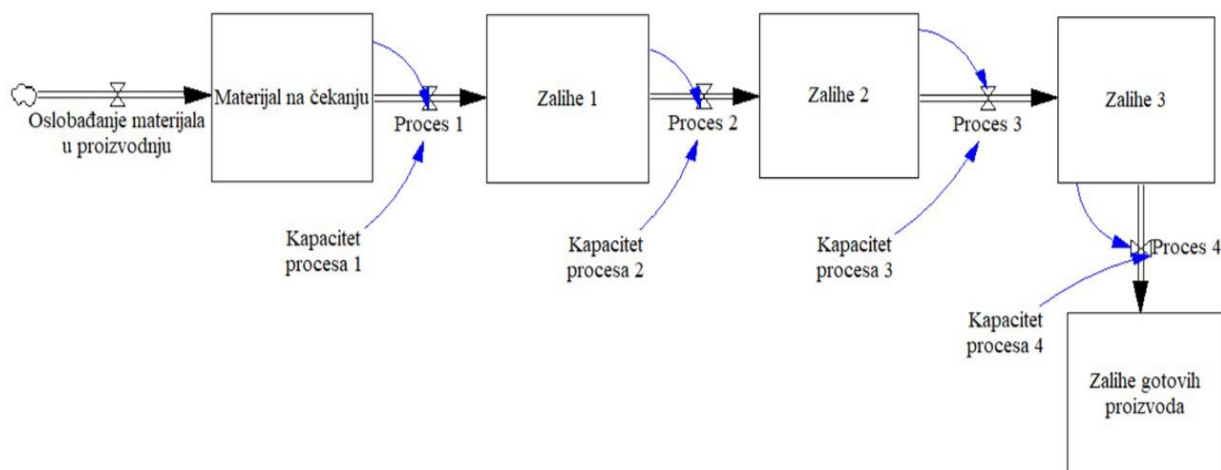
Сама имплементација теорије ограничења се заснива на континуалној примени 5 корака фокуса (*five focusing steps*), који дефинишу имплементацију ове методологије и управљање са главним ограничењем система. Ових пет корака фокуса могу се дефинисати на следећи начин (Goldratt, 1990):

1. *Идентификација главног уског грла унутар анализираних система.* Систем може имати више сегмената са нижим степеном продуктивности, међутим ако би сви сегменти били сагледани као целина, у складу са ТО, један сегмент ће садржати најнижи степен продуктивности и сходно томе он ће бити носилац главног уског грла. Свих пет корака фокуса налажу да целокупна стратегија оптимизације унутар фирме, као и нове капиталне инвестиције, морају бити усмерене на сегмент са највећим дефицитом у својим операцијама. Главно уско грло може бити у физичкој форми (производна јединица, машина, контролна технологија, људски фактор итд.), информационој форми (застој у протоку информација, дигитално процесирање, недостатак информација) или у форми менаџерске политике која дефинише како систем функционише. Једна од најчешћих форми уског грла унутар компаније се манифестује у форми управљачке политике, тј. саме одлуке људског фактора о начину организације рада чиме се формира уско грло унутар система.

2. *Успостављање процеса експлоатације главног уског грла у систему.* Овај корак се може сагледати као процес који није заснован на капиталним улагањима у нове капацитете или људске ресурсе, већ фокусирање на проналажењу и креирању протокола који могу да подигну степен продуктивности главног ограничења. У овом кораку је очекивано да се подигне степен протока на уском грлу. Битно је назначити да истраживања указују да у већини организација, уска грла која ограничавају систем нису физичког карактера (низак капацитет производне технологије, недостатак капацитета за процесирање, недостатак људства и сл.), већ постоје у форми лоше управљачке политике (Rahman, 1998).
3. *Усклађивање осталих ресурса према потребама ограничења.* У овом кораку битно је дефинисати на које начине ресурси (производне ћелије, погони или људи) који се налазе испред ограничења треба да функционишу према потребама ограничења. У производном окружењу, синхронизација производње са циљем да ограничење буде што продуктивније, од кључног је значаја, тј. да ограничење не буде у фази: чекања, недостатка компоненти или материјала од производних јединица које се налазе испред њега. Једна од честих стратегија за унапређење протока на уском грлу лежи и у бољем планирању производне припреме, као и бољој синхронизацији процеса одржавања уског грла и производних капацитета испред њега. Такође, и загушење главног ограничења са суфицитним радом може довести до повећања у застоју, као и нежељене акумулације инвентара у обради испред ограничења. Сходно томе, синхронизација рада према оптималном протоку код ограничења је од кључног значаја у овом кораку. Производни сегменти који имају значајно већи капацитет у односу на дефинисано уско грло и који се налазе иза уског грла, нису приоритет у овој фази имплементације. Разлог за њихову мању важност је чињеница да ови сегменти због свог суфицита у капацитету, брзо процесирају радне задатке који им пристижу, и било који губитак у времену код њих може бити лако надокнађен у односу на губитак код уског грла.
4. *Подизање капацитета главног ограничења представља финални корак у елиминацији ограничавајућег фактора унутар система.* У случају да није постигнут жељени степен продуктивности у систему кроз имплементацију; промене управљачке политике према ограничењу и успостављање нових протокола и синхронизације рада, имплементира се корак подизања капацитета главног ограничења. Овај корак може захтевати капиталне инвестиције у нове капацитете на позицији ограничења, кроз инвестиције у додатне машине, људске ресурсе или технологије које могу скратити процес одржавања или припреме.
5. *Повратак на први корак након успешне имплементације ТО.*

3.4. Симулација ефекта уског грла

Теорија ограничења налаже да у случају избегавања елиминације главног уског грла унутар система, сва остала унапређења унутар тог система представљају безначајно трошење ресурса. Ово је супротно приступу многих алтернативних теорија менаџмента, које предлажу унапређење целокупног система, тј. свих оперативних сегмената једног система. Проблем са унапређењем свих сегмената једног оперативног система може се видети у динамичком моделу производног погона (Слика 3.2).



Слика 3.2 Модел производног погона (Венсим софтвер)

На Слици 3.2 представљен је модел производног погона креираног у Венсим (Vensim) симулационом софтверу, специјализованом за динамичке симулације по принципима динамике система. Производни погон је сачињен од 5 дотока: ослобађања материјала у производњу и 4 процеса (Процес 1, Процес 2, Процес 3 и Процес 4). Такође, модел је сачињен и од 5 нивоа који дефинишу акумулиране залихе: материјала на чекању, залихе испред сваког процеса (Залихе 1, Залихе 2 и Залихе 3) и Залихе готових производа. У дизајнираном моделу залихе које се налазе иза процеса представљају инвентар у обради (Work in Progress Inventory) и то су залихе од процеса који је испред њих. Сходно томе Залихе 1 представљају све полуфабрикате који су одрађени у Процесу 1, и који чекају да буду преузети у Процесу 2. Капацитети процеса су дефинисани кроз 4 константе (Капацитет процеса 1, Капацитет процеса 2, Капацитет процеса 3 и Капацитет процеса 4). Како би модел био једноставнији у представљању ефекта главног уског грла или ограничења, капацитети процеса немају стохастичке вредности, као што је дефинисано у изразима модела приказаних у Табели 3.1.

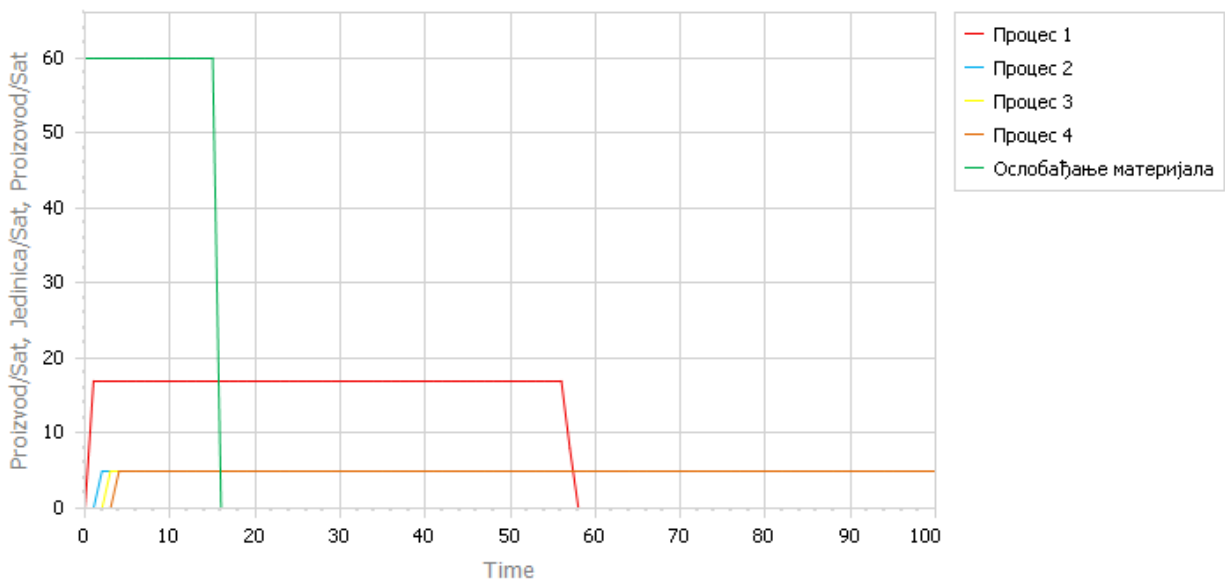
Табела 3.1 Формуле модела производног погона

Варијабла	Формула	Димензије
Процес 1	IF THEN ELSE (Капацитет процеса 1 > 0, IF THEN ELSE (Капацитет процеса 1 >	Производ/Сат

	Материјал на чекању, Материјал на чекању, Капацитет процеса 1),0)	
Процес 2	IF THEN ELSE (Залихе 1 > 0, IF THEN ELSE (Капацитет процеса 2 > Залихе 1, Залихе 1, Капацитет процеса 2), 0)	Производ/Сат
Процес 3	IF THEN ELSE(Залихе 2 > 0 ,IF THEN ELSE (Капацитет процеса 3 > Залихе 2, Залихе 2, Капацитет процеса 3), 0)	Производ/Сат
Процес 4	IF THEN ELSE (Залихе 3 > 0, IF THEN ELSE (Залихе 3 < Капацитет процеса 4, Залихе 3, Капацитет процеса 4),0)	Производ/Сат
Капацитет Процеса 1	17 (Константи)	Производ/Сат
Капацитет Процеса 2	5 (Константи)	Производ/Сат
Капацитет Процеса 3	15 (Константи)	Производ/Сат
Капацитет Процеса 4	20 (Константи)	Производ/Сат
Убацивање материјала у производњу	PULSE(0, 16)*60	Производ/Сат
Материјал на чекању	Иницијална вредност: 0	Производ
Залихе 1	Иницијална вредност: 0	Производ
Залихе 2	Иницијална вредност: 0	Производ
Залихе 3	Иницијална вредност: 0	Производ
Залихе готових производа	Иницијална вредност: 0	Производ
Метода интеграције	Euler / Time step: 1 / Initial time = 0 / Final time = 100	

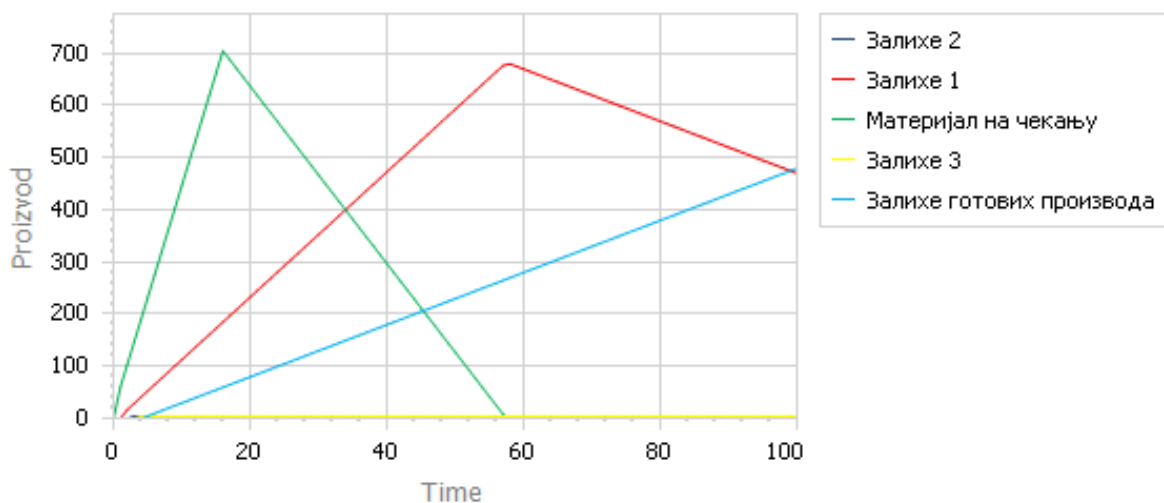
Упрошћени модел производног погона на Слици 3.2, узима у обзир одређене претпоставке које се могу видети кроз формуле у Табели 3.1. Производни процеси немају дефинисан минимални степен процесирања, међутим имају дефинисан максимални капацитет. То дефинише да производни процес неће чекати да се одређена количина материјала или полуфабриката акумулира испред њега. У дефинисаном моделу пре почетка симулације производна линија је била празна, што се може видети кроз иницијалну вредност

залиха која је 0. Сви производни процеси у моделу имају константне вредности, где процес број 2 има значајно мањи капацитет од осталих процеса. Такође, процес ослобађања материјала у производњу је независан од осталих процеса и дефинисан је пулс функцијом ($PULSE(0, 16) * 60$). Као што је приказано на Слици 3.3, материјал се пушта у производњу у првих 16 временских јединица и након тога престаје убацивање материјала, док процеси почињу са радом у тренутку кад материјал стигне до процеса.



Слика 3.3 Капацитети производних процеса

Симулација указује да једини процес који функционише у свом максималном капацитету је Процес 1. Разлог високих перформанси Процеса 1 лежи у његовој позицији испред главног уског грла у систему, сходно томе овај процес може функционисати под својим максималним степеном процесирања (17 производа/сат).

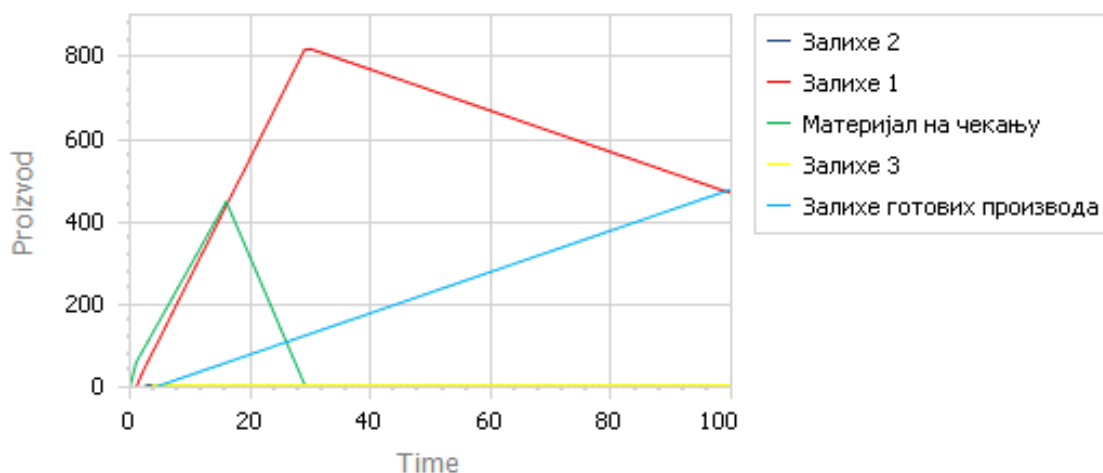


Слика 3.4 Акумулација залиха испред производних процеса

Кроз анализу дијаграма, приказаних на Слици 3.3 и Слици 3.4, може се увидети да процеси који се налазе иза главног уског грла, могу имати перформансе искључиво дириговане од стране главног уског грла. Сходно томе, Процеси 3 и 4 који имају дефинисане капацитете процесирања 15 и 20 производа/сат, процесирају само 5 производа/сат, што је максимални степен процесирања Процеса 2, које у овом систему представља главно уско грло. Слика 3.4 приказује акумулацију залиха испред производних процеса, као и смањење залиха материјала на чекању које се налази на почетку производног процеса. Највећа акумулација залиха полуфабриката се креира испред Процеса 2, тј. испред главног уског грла.

Једна од стандардних стратегија за идентификацију главног уског грла унутар система је и сагледавање где се налазе највеће концентрације незавршених производа или полуфабриката. Као што је приказано на Слици 3.4, Залихе 2, као и Залихе 3 су једнаке 0. Разлог за то је што процеси иза главног ограничења имају значајно већи капацитет од самог ограничења. Као што је већ наведено, унапређење продуктивности код сегмената који нису главно уско грло неће довести до повећања продуктивности целокупног система. То се може видети кроз симулирање истог производног система, где сви производни капацитети осим Процеса 2 ће бити дуплирани у свом максималном степену процесирања.

Симулирани модел на слици 3.5 приказује очекиван резултат у случају да се повећа продуктивност свих сегмената система, осим главног уског грла. Капацитети Процеса 1, 3 и 4 су повећани са 17, 15 и 20 производа/сат на 34, 30 и 40 производа на сат респективно. Капацитет Процеса 2 је остао на максималном степену процесирања од 5 производа/сат.



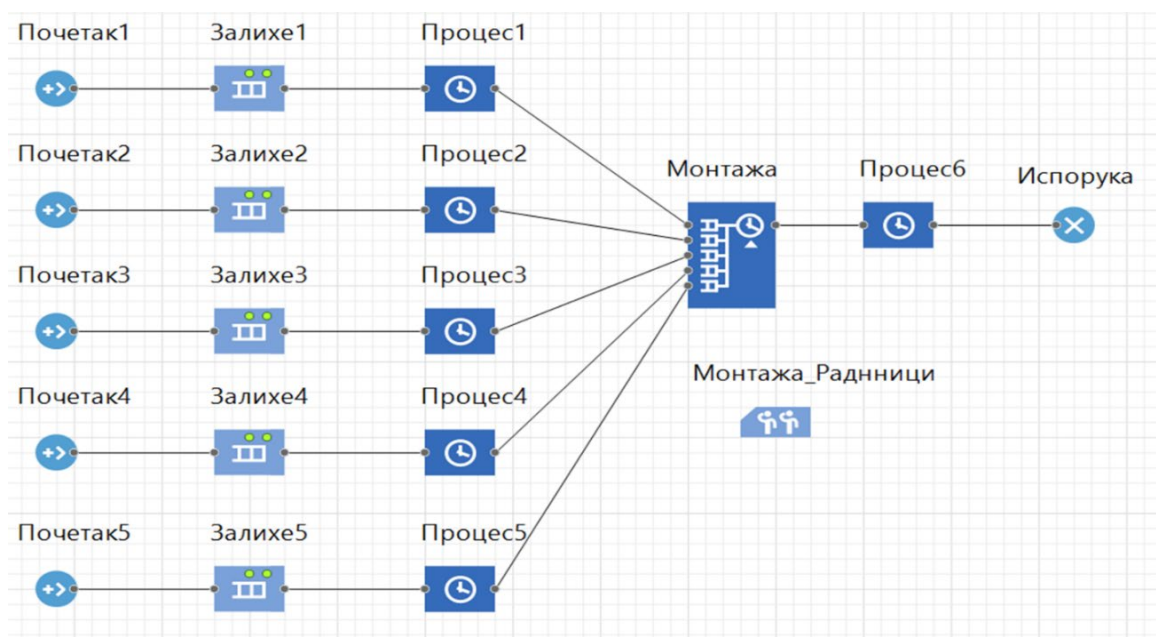
Слика 3.5 Акумулација залиха након дуплирања капацитета производних процеса

Дуплирање наведених капацитета је смањило залихе готових производа на почетку процеса, међутим ово није утицало на повећање готових производа на крају процеса, већ само до веће акумулације полуфабриката испред главног уског грла.

3.5. Симулација ограничења код паралелних процеса

Код симулационог модела који приказује функционисање линијског производног погона (Слика 3.2), приказан је ефекат уског грла у упрошћеном производном систему који нема паралелне процесе. За ову симулацију коришћена је стандардна симулациона библиотека за динамику система (ДС). Стандардне ДС библиотеке пружају низ функција специјализованих за моделирање и симулације дискретних догађаја, међутим постоји недостатак у могућностима за креирање комплекснијих процесно оријентисаних симулација. Код комплекснијих симулационих модела дискретних догађаја или модела са великим бројем процеса, коришћење конвенционалних ДС библиотека није препоручено, осим у случају коришћења алата попут Венсим-а који садржи велики број дискретних функција. Код оваквих модела оптимално је користити комбинацију библиотека: динамике система, симулација дискретних догађаја (СДД) и ако је потребно и симулација заснованим на агентима (СЗА).

За адекватну симулацију производног погона са паралелним процесима потребно је користити математичке функције, алгоритме и објекте из СДД библиотека. Симулациони модел приказан на Слици 3.6, обухвата пет линија паралелних процеса, као и постојање симулационог објекта који нумерички прорачунава процес монтаже (обједињује производе паралелних процеса). Модел обухвата и симулациони објекат “Монтажа Радници”, који симулира постојање радника у процесу монтаже. Наведени објекат додељује по једног радника сваком улазу у процес монтаже. Сви моделирани процеси, осим Процеса 6, имају објекте који симулирају акумулацију залиха на чекању. Процес 6 нема симулациони објекат за залихе, из разлога што монтажа има могућност задржавања залиха на свом излазу.



Слика 3.6 Модел производног погона са паралелним процесима
(AnyLogic)

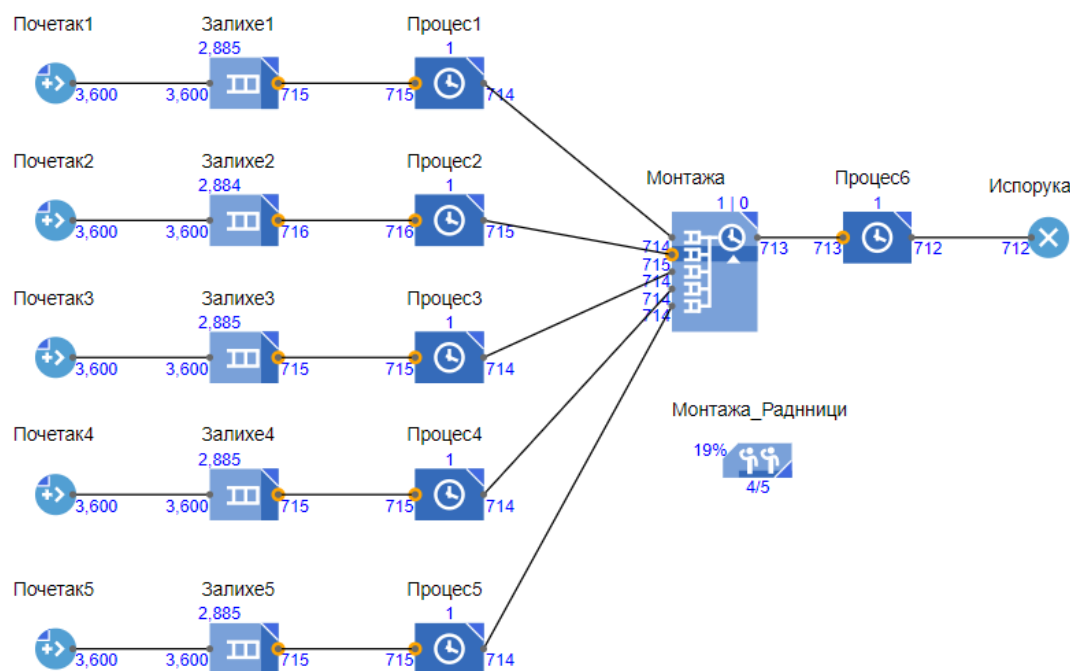
Модел је развијен коришћењем AnyLogic библиотеке за процесно оријентисано моделирање, а сама библиотека је заснована на СДД логици. Сви ДС модели креирани у Венсиму, могу бити учитани у AnyLogic симулационо окружење. Формуле за модел производног погона са паралелним процесима приказане су у Табели 3.2.

Табела 3.2 Формуле модела производног погона са паралелним процесима

Варијабла	Формула/Код
Почетак 1, Почетак 2, Почетак 3, Почетак 4, Почетак 5	Интервално време ослобађања са статистичком расподелом: <i>Poisson</i> (1, 1, 1, 0, 1)
Залихе 1, Залихе 2, Залихе 3, Залихе 4, Залихе 5	Дефинисани капацитет: максимални капацитет
Процес 1, Процес 2, Процес 3, Процес 4, Процес 5, Процес 6	Време застоја дефинисано статистичком расподелом: <i>Triangular</i> (4, 6, 5) Максимални капацитет процесирања: 1 Број потребних компонената од сваког улаза: 1 Излаз након процесирања: 1
Монтажа	Време процесирања: <i>Triangular</i> (4, 6, 5) Коришћени ресурс: Монтажа_Радници Дефинисани бафер капацитет на излазу: 5
Монтажа_Радници	Број дефинисаних радника: 5
Број_производа_у_систему(БПС)	Тип: <i>Double</i> Иницијална вредност: 0
БПС_Статистика	Континуални прорачун са временом
Почетак1, Почетак2, Почетак3, Почетак4, Почетак5,	Број_производа_у_систему++; БПС_Статистика.add(Број_производа_у_систему,time());
Испорука	Број_производа_у_систему--; БПС_Статистика.add(Број_производа_у_систему,time());

Структура приказаног модела има једноставну логику. Један процес не може обрађивати више производа у исто време (максимални капацитет процесирања: 1), а свих 6 процеса имају исто време процесирања производа и оно износи око 5 секунди (расподела *Triangular* (4, 6, 5)). Објекти за почетак производње (Почетак1, Почетак2...итд.) убацују материјал у производни циклус брзином око 1 производ у секунди (расподела *Poisson* (1, 1, 1, 0, 1)). Процес ослобађања производа на почетку процеса је независтан у односу на све остале процесе у моделу. У случају да неки од процеса нема капацитет да прати степ ослобађања, материјал ће се складиштити у залихама док не дође на ред за процесирање. Залихе у моделу имају дефинисан максимални капацитет, што значи да немају ограничену количину производа коју могу да складиште. У случају ограничавања максималног капацитета код залиха, пробијање дефинисаног капацитета условљава да модел буде заустављен, или да преузме неку другу акцију која је одређена.

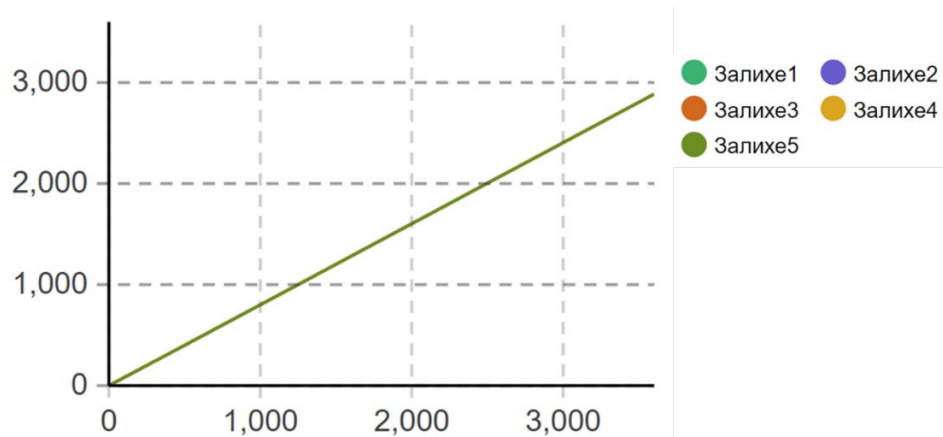
Објекат који дефинише монтажу има исти степен процесирања као и сви остали процеси у моделу (расподела *Triangular (4, 6, 5)*). Међутим, овај симулациони објекат има комплекснији систем рада у односу на остале процесе. На свом улазу има дефинисану минималну количину производа, која му је потребна од сваког улазног процеса (Број потребних компонената од сваког улаза: 1). Када монтажа добије по један производ, тј., компоненту од свих улазних процеса, након дефинисаног времена процесирања из монтаже изађе један готов производ. У случају да процес монтаже нема компоненту од једног од 5 процеса, процес монтаже неће бити обављен. Вредности за Пуасонову расподелу на почетку модела, узете су да генеришу што мање варијација код доласка материјала, ка циљу једноставности модела и бољег приказивања ефекта уског грла. На Слици 3.7 приказано је стање производног погона након симулираних 3,600 секунди функционисања производног погона. Сваки симулациони објекат приликом пуштања симулације, показује своју нумеричку вредност. Са леве стране симулационог објеката је приказано колико је производа или полуфабриката преузето, док се са десне стране види колико је производа напустило објекат, тј. завршило процесирање од стране симулационог објекта. Такође, са горње стране сваког објекта може се видети колико се производа тренутно налази у њему. Као што је већ претходно објашњено, сви процеси у моделу имају дефинисан максимални капацитет процесирања који износи 1 производ.



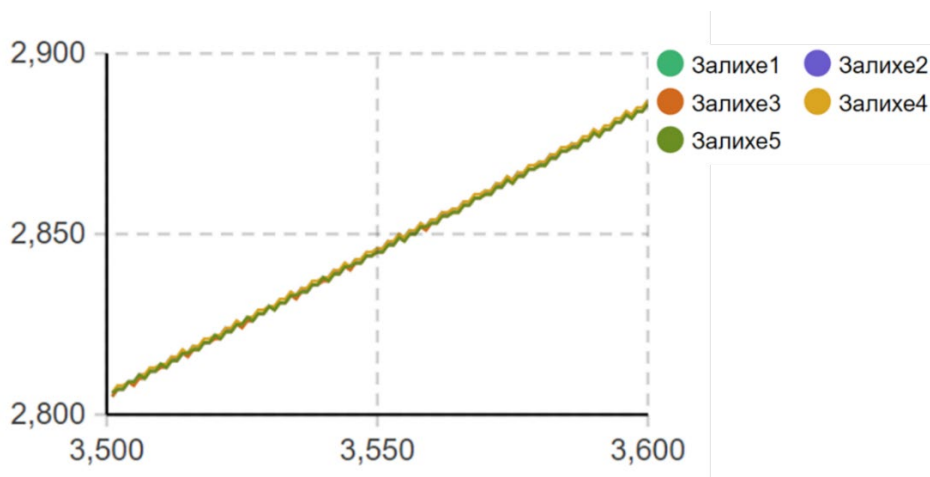
Слика 3.7 Стање производног погона са паралелним процесима након извршене симулације (AnyLogic)

Сходно томе, изнад сваког процесног блока може се налазити број 1, или 0 у случају да процес чека на долазак материјала. Насупрот томе, као што се може видети на Слици 3.7, нумеричка вредности изнад залиха указују на тренутно

стање материјала који је на чекању да буде процесирани. На дијаграму акумулације залиха (Слика 3.8) приказан је пораст залиха током целокупног временског периода симулације, као и у краћем временском периоду при крају симулације (Слика 3.9).



Слика 3.8 Акумулација залиха испред процеса током укупног времена симулације



Слика 3.9 Акумулација залиха испред процеса краћи период

Дијаграми акумулације залиха указује да производни процеси нису у могућности да прате брзину ослобађања материјала у систем.

Код модела који нема паралелне процесе (Слика 3.2) одабран је један процес да представља уско грло. Код модела са паралелним процесима и постојањем процеса монтаже (Слика 3.7) исти ефекат уског грла може бити очекиван без обзира код којег паралелног процеса је дошло до загушења. У случају да се време процесирања код Процеса 6 повећа са просечног времена од 5 секунди (*Triangular* (4, 6, 5)) на просечно време од 10 секунди (*Triangular* (8, 12, 10)), сви остали процеси у систему ће бити ограничени да функционишу по новом времену. Структура модела може указивати да процес који има највише утицаја на систем је процес број 6, који се налази на самом крају система, или процес монтаже. Међутим, неvezано који од процеса је изабран да буде главно уско грло, и у структури са паралелним процесима, целокупни систем ће се

адаптирати према капацитету ограничења. Перформансе система у зависности од избора уског грла се могу видети у Табели 3.3.

Табела 3.3 Перформансе система у зависности од локације уског грла

Локација уског грла	Излаз система
Процес 1	361 производа
Процес 2	359 производа
Процес 3	359 производа
Процес 4	358 производа
Процес 5	359 производа
Монтажа (повећање времена и смањење радника)	(утилизација радника монтаже >95%)
Монтажа (повећање времена и исти број радника)	712 производа (утилизација радника монтаже >30%)
Процес 6	359 производа

Као што је приказано у Табели 3.3, без обзира на локацију уског грла, генерисани излаз система је идентичан са појавом малих варијација. У случају монтаже где је време процесирања повећано са просечног времена 5 секунди (*Triangular* (4, 6, 5)) на просек 10 секунди (*Triangular* (8, 12, 10)), како би овај сегмент система постао уско грло потребно је смањити број радника са 5 на 1. У супротном излаз система ће остати идентичан, док ће се утилизације радника значајно повећати.

Без обзира на дизајн производног система или било којег система са процесима који су међусобно зависни, процес који је главно уско грло у систему ће дефинисати степен продуктивности целокупног система. Креирани симулациони модели уских грла у производном систему (Слика 3.2 и Слика 3.7), указују и на потенцијални ризик прекомерног смањења залиха испред уског грла, који може довести да процес који је идентификован као уско грло има ниску утилизацију. LEAN методологија предлаже континуално смањење залиха, без обзира на њихову позицију у односу на уско грло у систему.

3.6. Дефинисање ризика код LEAN предузећа - континуално смањење трошкова

LEAN производна стратегија се често дефинише као ефикасан приступ континуалним смањењу трошкова (Baranov, at. all, 2010). Поред параметара попут производног времена реализације (*lead time*), повећања продуктивности, смањења дефеката, један од кључних параметара кроз који се манифестује успешна LEAN имплементације јесте континуално смањење трошкова (Јаћ, at. all, 2013). Од кључног је значаја дефинисати процес скраћења трошкова, тј. одакле смањење оперативних трошкова компаније произилази. Једна од честих критика LEAN имплементација јесте систематско смањење радних места унутар компаније. Иако LEAN филозофија не пропагира смањење радних места након успешне оптимизације и повећања продуктивности, многе структуралне промене које произилазе из LEAN-а могу довести до смањења за потребом сталног ангажовања већег броја радника.

JIT (*just in time*) и LEAN компаније као обавезну структуралну промену, пропагирају смањење акумулације производних сировина. Процес акумулације производних сировина се манифестује кроз креирање залиха на почетку производног процеса. Ова стратегија се спроводи кроз набавку потребних сировина искључиво када су оне потребне, уз оптимизовану синхронизацију осталих производних сегмената. Наведена стратегија доводи до значајних смањења трошкова и стабилнијих финансијских параметара предузећа. Међутим, имплементација ове стратегије доводи и до смањења потребе за већим бројем радника на наведеним позицијама, као и смањењу броја радника који се налазе у сталном радном односу (Kalleberg, 2009).

Као што је већ наведено, LEAN приступи не пропагирају смањење оперативних трошкова кроз смањење радних места, међутим ова методологија је често практикована у пракси (Womack and Jones, 1997). Смањење радне снаге као циљу смањења оперативних трошкова, са собом носи низ ризика. Један од кључних ризика је немогућност брзог реаговања на флукуације на тржишту, као ефекат недостатка радне снаге. Очекивано је да фирма није у могућности да нагло повећа своје оперативне капацитете, из разлога што регрутација и обука нових радника представља процес који носи висок степен неизвесности и може захтевати доста времена за реализацију (Trost, 2014). Међутим, агресивно редуковање радне снаге у краћем временском периоду представља један од најнефикаснијих метода за максимизацију профита, и редукацију трошкова, док на дужој стази овај процес може проузроковати губитак конкурентности и колапс компаније (Hooke, 2021). Губитак високо обучених радника због остваривања краткотрајних финансијских циљева, може представљати велики ризик поготово у високо-технолошком сектору, као и у свим компанијама заснованим на производњи и развоју комплексних производа и услуга. Битно је назначити вишедеценијско постојање дефицита у високо-обученој радној снази на глобалном нивоу (Schneider, et. al., 2020). Овај феномен је проузрокован процесом глобализације, и све већом потребом компанија и корпорација да запосле високо-обучене раднике.

Агресивно смањење радне снаге може бити избегнуто приликом транзиције компаније да оствари LEAN статус, што може представљати одрживије решење у дужем временском периоду. Међутим, битно је истаћи постојање друге форме скраћења оперативних капацитета које ова методологија подржава. LEAN методологија предлаже могућност распродаје производних ресурса попут: опреме, машина или читавих производних погона, у случају да они постану "растерећени", као продукт успешног смањења укупног времена реализације (Womack, Jones, 1997).

Смањење капацитета, након што они пређу на низак степен утилизације, као и држање залиха сировина и резервних компонената на почетку производног циклуса, може имати велике финансијске бенефите. Поготову у случају ако постоји могућности да се изврши распродаја растерећених производних сегмената, који су постали вишак. Међутим, све индустрије пролазе кроз економске циклусе, и самим тим може се очекивати значајна нелинеарност у понуди и потражњи. У одређеним индустријским циклусима компаније, након

што су годинама смањивале своје капацитете кроз смањење броја радника, као и растерећених капацитета, због погодних економских услова одлуче да нагло повећају своје капацитете. Ове стратегије у већини случајева се показују као лоше, са катастрофалним повраћајем на инвестирани капитал (Chancellor, 2016). Такође, периодично се могу очекивати и економске кризе или шокови попут глобалних пандемија или рата. Глобална COVID-19 пандемија за коју се верује да је почела 2020. године, показала је низ проблема, попут систематских несташица у ланцима снабдевања широм развијеног света (Aday S and Aday MS, 2020). Једна од честих критика је да су агенти у ланцима снабдевања постали превише LEAN, што креира неодрживе ланце снабдевања на шокове и нагле помене попут пандемија (Sarkis, 2020). Један од главних предуслова за LEAN и ЈИТ ланац снабдевања је да компанија има добављача од којег може да обнавља своје наруџбине брзо, без потребе да наруџбине сировина буду толико велике да стоје као резервне залихе. Наведени процес може да захтева да добављач буде географски близу, као и да фирме улазе у дугорочне уговоре са тим добављачима како би компензовале чешће и мање набавке. Једна од честих критика LEAN-а је да овакав систем ланца снабдевања ефикасно функционише у Јапану, из разлога што је у питању географски мала држава са врло стабилном економијом. Међутим, низ ризика се може очекивати ако компанија није у могућности да буде агилнија у набавци сировина и компонената за своје производе. Такође, у случају да дође до значајног периодичног пада цена сировина или компонената, компанија која има политику да избегава инвестиције у залихе није у могућности да искористи ту прилику. Битно је истаћи да постоје разлике у LEAN предузећима у Јапану и државама попут Америке, у приступима контроле залиха у својим ланцима снабдевања (Aghazadeh, 2003).

Теорија ограничења предлаже коришћење резервних залиха или бафера на одређеним локацијама у оперативним системима, као и у ланцу снабдевања (Schragenheim, et. al., 2009). Недостатак бафер залиха, како унутар предузећа, тако и у ланцу снабдевања, може проузроковати да LEAN предузећа, као и ЈИТ ланци снабдевања, буду фрагилни на различите шокове и промене.

4. МЕНАЏМЕНТ РИЗИКОМ

Менаџмент ризиком представља једну од најважнијих области научног истраживања у 21. веку, како у друштвеним наукама тако и у техничко технолошкој сфери истраживања. Разлог за експоненцијални раст ове области произилази из повећања повезаности и међусобне зависности компанија, корпорација и држава.

Са повећањем међусобне зависности и повезаности између различитих ентитета, као директне последице глобализације, долази и до губитка ефекта локализације ризика. Губитак ефекта локализације проузрокује да нежељене појаве и догађаји, престају да буду сконцентрисани и изоловани код једног ентитета или географске локације. Процес глобализације је омогућио државама и економским субјектима да значајно брже генеришу вредност, међутим исти економски субјекти долазе у могућност да деле ризик, као и да нежељени догађаји имају већи утицај и интензитет.

Глобална економска криза 2008. године показала је ефекте нежељених догађаја у међузависном глобалном финансијском систему. Такође, рецесија 2008. године указала је и на значај и важност менаџмента ризиком, тј. које су последице када институције и компаније користе лоше методе у процени ризика (Quon, Zeghal and Maingot, 2012).

Потреба за ефектним методама у процени и управљању ризиком, се огледа и у убрзаном смањењу животног века најуспешнијих светских корпорација (Јовичић, et al., 2019), што представља последицу раста конкурентности светских тржишта. Повећање конкурентности на светским тржиштима, често доводи и до повећања нежељених дисрупција у глобалним ланцима снабдевања (Tang, 2006). Колапси у ланцима снабдевања постају све чешћа појава у уско конектованом глобалном систему (Sheffi, 2007).

Међутим, потреба за константним развојем метода и алата за анализирање и превенцију ризика, може се увидети и изван економске сфере, пре свега у областима глобалне безбедности. Иако нежељени инциденти хемијског, биолошког, радиолошког и нуклеарног (ХБРН) карактера, представљају константну претњу по глобалну безбедност (Ivanova and Sandler, 2006), не треба занемарити потенцијалне ризике условљене глобалним загревањем (Tsur and Zemel, 1996). Такође, треба нагласити епидемиолошке догађаје, попут епидемија и пандемија, као један од кључних глобалних ризика. Историјски, епидемиолошки догађаји представљају егзистенцијални ризик глобалних размера (Watts, 1997). Овакви догађаји захтевају највиши степен припремљености, како здравственог система, тако и логистичких ланаца. Епидемиолошки догађаји поред директних последица на људски живот, могу имати драстичне нежељене ефекте на глобалне логистичке системе и финансијска тржишта, што може значајно повећати нежељене ефекте епидемиолошког догађаја (Zhang, Hu and Ji, 2020). Компаније и организације које немају успостављене и стандардизоване системе за управљање ризиком, налазе се у лошој позицији у високо динамичном глобалном окружењу.

4.1. Врсте и приступи у управљању ризиком

Појам ризик дефинише вероватноћу као и величину губитка, приликом реализације нежељеног догађаја. У случају коришћења појма менаџмент ризиком (risk management), акценат се ставља и на управљачки део, који подразумева и процес митигације (ублажавања) или превенције, поред спровођења саме анализе ризика. Постоји низ начина на који се може извршити сегментација области менаџмента ризиком по својој примени.

Један од честих начина је подела према методама које се користе за анализу ризика, и оне могу бити по својој структури већински квантитативне или квалитативне. Међутим, ако се узме пример управљања ризиком у пословним предузећима или ЕРМ (Enterprise Risk Management), ова под-област менаџмента ризиком садржи како квантитативне, тако и квалитативне методе. Сходно томе, било која сегментација менаџмента ризиком треба да буде фокусирана преваходно према области примене, а не карактеристикама алата који се користе.

Једна од стандардних подела сегмената или под-области менаџмента ризиком обухвата (Hubbard, 2020):

- управљања ризиком у пословним предузећима или ЕРМ (Enterprise Risk Management),
- управљање портфолиом или пројектни портфолио менаџмент,
- опоравак од катастрофе и пословно превентивно планирање DR&BCP (Disaster recovery and business continuity planning),
- менаџмент ризиком у оквиру пројекта,
- менаџмент регулаторних ризика,
- управљање у ургентним и ванредним ситуацијама.

Анализа ризика може бити примењена на било који социјални, технолошки или еколошки систем, без обзира на његову комплексност или ниво апстракције. Анализе ризика могу бити усмерене ка анализи компанија (Bromiley, et al., 2015), ванредних догађаја (Lavell and Maskrey, 2014), еколошким системима (Chen, Chen and Fath, 2013), здравственим установама (Duncan, 2011), глобалним финансијским системима (Taleb, et al., 2012), итд. Предмет истраживања докторске дисертације је анализа ризика унутар LEAN система, сходно томе ЕРМ методологија ће бити примарно анализирана.

Као што је већ назначено, ЕРМ или анализа и митигација ризика унутар пословног система, користи широк спектар алата који по својој структури могу бити како квалитативни, тако и квантитативни. ЕРМ је пронашао практичну примену у свим областима економије, ако се сагледава ниво предузећа. Најзначајнија примена ЕРМ-а је у области банкарства (Wu and Olson, 2010) и осигурања (Hoyt and, Liebenberg, 2008), где имплементација ЕРМ представља битан сегмент у превенцији финансијских криза попут глобалне рецесије 2008. године.

У зависности од државе, регулаторне агенције могу законски обавезати компаније да имплементирају одређену форму ЕРМ-а. Битно је назначити да примена стандардизованих форми ЕРМ-а изван финансијског сектора постоји деценијама, као и да има ефикасну примену у економским секторима попут: производње (Iswajuni, Manasikana and Soetedjo, 2018), енергетском сектору нафте и гаса (Annamalah, et al., 2018), здравства (Etges, et al., 2019), информационих технологија (Saeidi, et al., 2019), одрживог развоја (Olson and Wu, 2017), итд.

Приликом сагледавања метода које се могу користити у ЕРМ-у, битно је спровести сегментацију метода према њиховој структури, као и према њиховој практичној корисности приликом анализе и превенције ризика. Методе које се могу окарактерисати као “меки алати”, генеришу закључке и податке нижег квалитета, што може довести до непримереног преузимања ризика. У категорију метода које могу генерисати закључке и податке нижег квалитета убрајају се:

- експертска интуиција,
- експертска ревизија,
- класификација ризика кроз групно гласање и
- коришћење матрица или мапа ризика.

Све наведене методе су превасходно квалитативне, и засноване су на интуицији и претходним искуствима учесника у одлучивању. Иако ове методе потенцијално могу да генеришу погрешне одлуке везане за преузимање одређеног ризика, битно је истаћи да у одређеним условима одлучивања, где постоји недостатак адекватних података, коришћење наведених метода може бити једина опција.

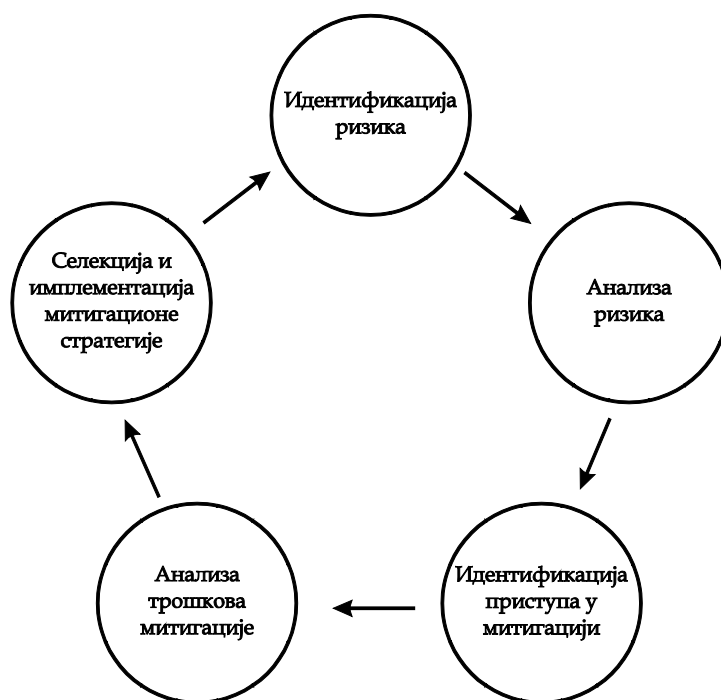
У групу метода, које се могу окарактерисати као “ригорозније” у анализирању ризика, спадају:

- методе засноване на *weighted risk score* приступу,
- стандардне статистичке методе анализе историјских података,
- стандардизоване финансијске анализе ризика,
- анализе засноване на пробабилистичким методама и
- симулационе анализе које могу обухватати комбинацију више различитих метода.

Од свих наведених метода, највеће могућности у анализи ризика пружају симулациони модели. Корисност симулационих технологија се огледа у могућности комбиновања свих изнад наведених метода, у зависности од потребе и могућности анализе која се спроводи.

Креирани симулациони модели за анализу ризика, такође имају могућност да се користе као алат за даљу митигацију и праћење ризика. У зависности од симулационе платформе, модел анализираног система може бити претворен и у функционалну *digital twin* апликацију (Makarov, et al., 2019), што даје значајне могућности у свакодневном праћењу и предикцији понашања комплексних система попут ланаца снабдевања (Barykin, et al., 2020) или производних система (Vécue, et al., 2020).

Један од најчешћих начина за дефинисање процеса управљања ризиком, састоји се од пет корака, и представља циркуларан процес (Hubbard, 2020), као што је приказано на Слици 4.1.



Слика 4.1 Конвенционални приступ у циклусу управљања ризиком (Hubbard, 2020)

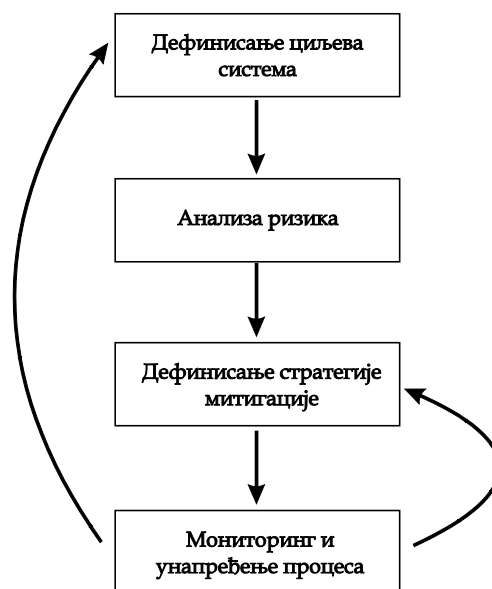
Конвенционални приступ предлаже да се у првом кораку користе алати за идентификацију ризика. Идентификација треба да буде заснована на историјским подацима о систему, као и на ригорозној анализи тренутног стања система. Иако историјски подаци о анализираном систему могу бити од великог значаја, кључни део анализе у овом кораку мора бити усмерен ка тренутном стању у којем се анализирају систем налази.

Након што је ризик идентификован, следећи корак представља сама анализа ризика. У овом кораку препоручено је коришћење пробабилистичких модела, као и других алата који могу дефинисати колики је очекивани губитак у случају реализације нежељеног догађаја. Излазне информације овог корака морају указати на вероватноћу реализације нежељеног догађаја, као и на очекивани губитак у случају реализације.

Трећи корак дефинише први део процеса митигације или ублажавања ризика. Након спроведене анализе ризика, битно је дефинисати све расположиве опције за митигацију ризика. Процес дефинисања опција се спроводи кроз истраживање и анализу како је идентификовани ризик претходно био саниран, као и кроз анализу тренутних могућности система. Пре него што се стратегија за митигацију селекује и имплементира, битно је спровести и анализу трошкова стратегије.

Једноставнији приступ у анализи и митигацији ризика приказан је на Слици 4.2. У алтернативном приступу анализира се ризик који је везан за одређени циљ система попут:

- развоја нове технологије,
- пласирања новог производа на тржиште,
- отварања нових производних капацитета,
- стратегије смањења људских грешака у медицинском систему, и сл.



Слика 4.2 Алтернативни приступ за анализу и митигацију ризика

У првом приступу анализа се спроводи са циљем идентификације свих присутних ризика унутар система, и након тога се спроводи сегментација најугрожавнијег. Проблем са таквим приступом се може увидети у великим системима, где може бити присутан висок степен диверзификације у операцијама. У великим системима попут корпорација, или већим компанијама које су диверсификоване, приликом генералне анализе ризика може доћи до различитих закључака који је приоритетни ризик (Unit EI, 2007). Приликом генералне анализе ризика широк спектар опција може бити манифестован попут:

- тржишног ризика,
- могућности губитка репутације,
- технолошког ризика,
- регулаторних промена итд.

У случају да је анализа ризика високо сконцентрисана на одређену оперативну стратегију или циљ, низ проблема који се јављају у генералној анализи ризика могу бити избегнути (Sheffi, 2007). Алтернативни приступ предлаже децентрализацију анализе ризика унутар компаније, где различити департмани компаније анализирају ризике који су најрелевантнији за њихове операције. Иако за разлику од Слике 4.1, Слика 4.2 не показује кораке попут анализе трошкова процеса митигације, као и одабир стратегије митигације, ти

кораци се подразумевају у процесу дефинисања саме стратегије митигације. Главна разлика у два приступа се може увидети у задњем кораку алтернативног приступа, тј. у процесу мониторинга и унапређења процеса контроле ризика. Једна од честих пропуста у менаџменту ризиком је лоше дефинисање процеса мониторинга митигационе стратегије (Hubbard, 2020).

Сам недостатак адекватног мониторинга превентивних мера, може довести до лошег разумевања која стратегија даје адекватне резултате у контроли ризика. Такође, битно је издвојити да све активности у анализи и митигацији ризика, представљају низ процеса. Све активности засноване на процесу имају потенцијал ка континуалном унапређењу (Goldratt and Cox, 2005).

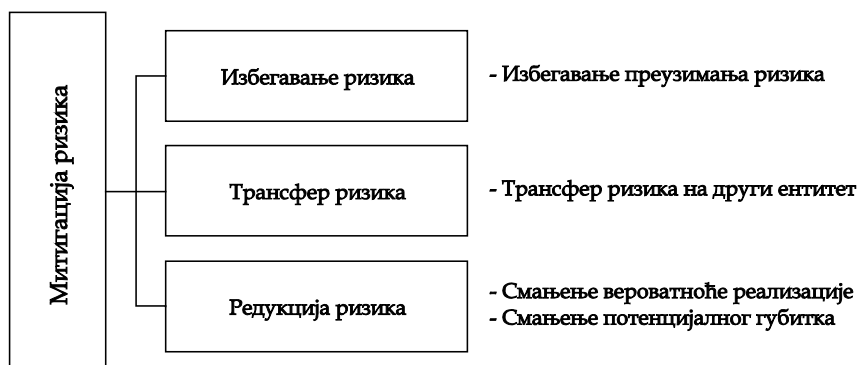
4.2. Процес митигације ризика

Процес митигације (умањења) ризика у финансијском сектору спроводи се кроз:

- процес избегавања ризика,
- спровођење трансфера ризика и
- проналажење начина да се умањи ризик (Barjaktarović, 2009).

Претходно наведене методе су, по својој структури, универзалне за примену и у другим индустријама. На Слици 4.3 приказан је процес митигације ризика, кроз три расположиве стратегије.

Као пример прве стратегије митигације ризика, може се узети компанија која се налази у производном сектору. Производна компанија разматра инвестицију у развој новог производа како би повећала своју конкурентност на тржишту. У случају да департаман компаније који спроводи анализу изводљивости развоја новог производа, дође до закључка да компанија нема производне капацитете као и експертизу за развој производа. Једна од митигационих стратегија коју производна компанија може да спроведе је процес избегавања преузимања ризика.



Слика 4.3 Универзалне стратегије за митигацију ризика

У наведеном процесу производна компанија би одбила да инвестира у развој новог производа, све до тренутка креирања потребне експертизе кроз:

обуку радника, ослобађање производних капацитета, запошљавање нових радника или аквизицију компанија која има капацитете да развије жељени производ.

Процес трансфера ризика се спроводи кроз пребацивање ризика на алтернативни ентитет који жели да преузме ризик, где наведени ентитет препознаје корист у таквој трансакцији. Ова стратегија је уобичајена у трансакцијама између финансијских институција.

Стратегија трансфера ризика може бити имплементирана и изван финансијског сектора, поготову у ланцима снабдевања и дистрибутивним мрежама. У случају да компанија жели да преузме одређени ризик, проналажење начина да се постигне генерална редукција ризика је препоручена.

Генерална редукција ризика може бити имплементирана кроз проналажење начина да се смањи вероватноћа реализације нежељеног догађаја, као и кроз имплементацију иницијатива ка смањењу потенцијалних губитака, ако дође до реализације нежељеног догађаја.

4.3. Фрагилност као концепт за анализирање ризика система

Научна област менаџмента ризиком пролази кроз континуални транзициони период од почетка глобалне економске кризе 2008. године. Транзиција је превасходно усмерена ка креирању доменско специјализованих и алтернативних метода, које омогућавају боље анализирање високо утицајних нежељених догађаја по компаније, државе и еколошке системе (Јовичић and Маџуџић, 2019).

Период 80-их година прошлог века има значајан утицај на начин на који се дефинише и сагледава ризик. У наведеном периоду, генерише се низ истраживања која указују на технолошка ограничења у предикцији понашања социјалних система, као и генералну лимитираност у прецизном предвиђању нежељених догађаја (Makridakis, 1981). Спроведена истраживања из тог периода указују на низ недостатака у алатима за предикцију догађаја великог утицаја попут рецесија, ратова и епидемија. Такође, наглашена су и ограничења у предикцији позитивних догађаја великог утицаја, попут предвиђања нових фармацеутских решења или који производ и компанија ће заузети лидерску позицију. У низу раних истраживања везаних за валидност менаџерских алата, дошло се до закључка да поред субјективних недостатака у предикцији, постоји и неразумевање како и када је одређени догађај, попут рецесије, започео као и колики је његов негативни утицај (Makridakis, 1982).

Задња деценија 21. века означила је експоненцијални раст у коришћењу рачунара у свакодневном животу, и њихову употребу као есенцијалан алат за доношење одлука. Информатичку револуцију прати и креирање области попут вештачке интелигенције, науке истраживања података (Data Science), као и технологије засноване на великим скуповима података (Big Data).

Међутим, и поред креирања наведених технологија постоји јако мало доказа да државе и институције имају боље капацитете у предикцији високо утицајних догађаја (Makridakis and Taleb, 2009). Ниске могућности институција у предикцији нежељених догађаја се могу огледати у примерима попут Covid-19 пандемије 2020. године, као и у ратним конфликтима између држава, и потенцијалним финансијским последицама које произилазе из таквих сукоба (Chortane and Pandey, 2022). Многа истраживања преиспитују генералну корист високо софистицираних технологија за истраживање великих скупова података у контексту социјалних система, као и коришћење напредних алгоритама за предикцију (Veeramachaneni, 2016). Иако прикупљање великих количина података и коришћење технологија заснованих на вештачкој интелигенцији, може донети низ предности у бољем доношењу одлука унутар компаније или организације, имплементација ових технологија се показала изазовном у многим индустријама, са још увек занемарљивим резултатима (Enholm, et al., 2021).

У периоду Covid-19 пандемије здравствени сектор на глобалном нивоу је показао изузетно лоше резултате у пројектовању будућих оперативних сценарија на основу прикупљених историјских података. Здравствени сектор карактерише и финансијско планирање које ретко осликава реалне потребе свакодневних операција. Проблеми у овом типу планирања произилазе из превеликог ослањања на историјске податке (Clancy, 2008). Сви наведени проблеми у планирању унутар социјалних система, указују да су многе од наведених технологија још увек у својим раним фазама развоја, као и да предикција одређених ризикантних догађаја представља изузетан изазов без обзира на количину прикупљених података.

Са публикацијом књиге *The Black Swan: The impact of the highly improbable* (Taleb, 2007), започета је значајна транзиција у области менаџмента ризиком. Такође научна заједница, као и индустријски сектор, започели су да преиспитују поузданост многих математичких модела који су се конвенцијално користили за анализу ризика. Такође, битно је назначити да софистицирани математички модели, могу креирати феномен илузије постојања контроле над проблемом (*illusion of control*), што може повећати преузимање ризика код менаџера који има високо поверење у генерисане резултате од стране модела. Поузданост било којег модела који анализира понашање комплексних социјалних система, константно мора бити преиспитивана, поготову у контексту *Black Swan* догађаја.

Када се дефинише *Black Swan* догађај, подразумева се феномен који може имати позитивне или негативне импликације по одређени систем. Терминологија налаже и да се јасно евидентира редак и неочекиван догађај по индивидуу или шири систем (Aven, 2015). Термини који се често користе приликом дефинисања и описивања *Black Swan* догађаја су:

- неизвесност,
- недостатак информација,
- ниска вероватноћа,
- нелинеарност,
- асиметрија,
- недостатак историјских података итд.

Ове догађаје тешко је предвиђати из скупова историјских података, што их и чини неочекиваним. *Black Swan* догађаји могу имати позитиван (иновативне технологије које промене индустрију), или негативан исход (изненадна рецесија или пандемија, попут COVID 19). Сам концепт, као и теорија која га дефинише, пронашао је мултидисциплинарну употребу у многим научним дисциплинама, као што су:

- анализа биолошких ризика (Anderson, Branch and Cooper, 2017),
- индустријски менаџмент безбедности (Murphy and Conner, 2012),
- монетарна политика (Taylor and Williams, 2009),
- пројектни менаџмент (Hajikazemi, Ekambaram and Andersen, 2016),
- дефинисање ризика у хирургији (Vacante, D'Agata and Motta, 2012).

4.4. Симулација фрагилности система

Нека од најзначајнијих истраживања у области менаџмента ризиком су везана за сагледавање недостатака у конвенционалним алатима за анализирање ризика (Hubbard, 2009). Наведена истраживања не предлажу да су сви алати у овој области дефектни у идентификацији и превенцији нежељених догађаја, већ предлажу бољу адаптацију алата према систему који је анализиран, као и разумевање ограничења алата који се користе. Такође, један од кључних циљева области менаџмента ризиком треба да буде усмереност ка континуалном унапређењу алата, што налаже да сами алати морају константно бити тестирани и анализирани експерименталним путем.

Један од кључних приступа ка креирању бољих алата за анализирање ризика, који пружају боље могућности ка континуалном унапређењу су обједињавање симулационих технологија са методологијама за анализу ризика. Мултидисциплинарне симулационе технологије попут динамике система (Homer and Hirsch, 2006) и симулација заснованим на агентима (Luke and Stamatakis, 2012), у константном су процесу миграције ка симулирању ризичних сценарија, као и у процени ризика у социјалним системима. Иако ове методе могу да пруже значајно веће могућности у планирању ризичних сценарија, корисност симулационог модела највише ће зависти од два кључна сегмента: квалитета прикушљених података, као и структури креираног модела.

Као што је већ наглашено, комплексни системи су у могућности да генеришу нелинеарно, волатилно (*volatility*) и неочекивано понашање, што чини предикцију њиховог будућег стања неизвесним. Приликом анализирања будућег стања комплексног система попут компаније, што се временски период анализе повећава, и сама неизвесност будућег стања расте. Већина метода за анализу ризика показује висок степен ефикасности у предикцији мањих нежељених догађаја, који су учестали. Међутим, предикција негативних догађаја високог утицаја, показала се као изазов за већину алата у овој области (Јовичић, et al., 2019). Самим тим долази се до постављања кључног питања у области менаџмента ризиком које гласи: "Ако нисмо у стању да предвиђамо, како можемо да планирамо?" (Makridakis, 1981).

Један од потенцијалних одговора на наведено питање, је да сам процес планирања и превенције одређених врста ризика, мора бити усклађен са недостатком прецизности у предикцији. Симулационе технологије у многим случајевима неће пружити боље могућности предвиђања, попут када ће се неки од ретких догађаја реализовати. Иако генерална ограничења у предикцији постоје и код симулационих технологија, симулациони модели могу допринети бољем разумевању самог система, као и динамике нежељеног догађаја.

Препоручен начин у анализирању комплексног система и његове изложености нежељеним појавама је сегментирање система у три категорије:

- фрагилан (крт),
- робустан и
- антифрагилан (Taleb, 2012).

Авен (2014) је фрагилан систем описао као „лако ломљив“, при чему је посебан осврт дао на квантитативну мерљивост појма лаке ломљивости система. У управљању ризиком, при квалитативном опису „лаке ломљивости“ система често се користе појмови као што су: резилијантност (resilience) и вурнеабилност (vulnerability) (Sheffi, 2007), као и појмови осетљивост (sensitivity) и волатилност (volatility) (Sheffi, 2017). Поделе система на вурнеабилне и робусне су извршене на основу типа стресора којима су ти системи изложени и како ти системи реагују на дате стресоре (Aven 2013).

Робусни системи су у могућности да одрже свој интегритет под утицајем континуалне нестабилности. Ови системи су дизајнирани да поднесу високе шокове. Дефинисање да ли је систем робустан, као и на које врсте стресора је отпоран, у многим случајевима не представља велики изазов. Међутим, систем који има највећу супротност у односу на систем који се може дефинисати као фрагилан или крт, је антифрагилан систем (Größler, 2020).

Док су робусни системи у стању да буду континуално изложени стресорима без значајних промена, антифрагилни системи имају карактеристику да се адаптирају на стресоре. Ови системи функционишу попут биолошких система, где под утицајем нежељених догађаја долази до покретања процеса адаптације у систему. Процес адаптације код биолошких система, након што је систем био изложен нежељеном догађају, представља кључни сегмент у процесу еволуције биолошких система. Насупрот антифрагилним и робусним системима, фрагилни системи лако долазе до краха. Такође, ови системи су склони великим губицима и често нису резилијантни након колапса. Под концептом резилијантности се подразумева да систем након губитка у перформансама, има капацитет да се поврати на првобитно стање.

Антифрагилност и резилијантност система су различити концепти, из разлога што након реализације нежељеног стресора и пада перформанси система, антифрагилан систем се адаптира на степен изнад стања пре појаве стресора (Taleb, 2012). Другим речима, анти-фрагилан систем се адаптира да у случају поновне појаве стресора, буде у могућности да не поднесе губитке.

Симулирање фрагилности комплексног система се може остварити у значајно већој мери, у односу на конвенционалну процену ризика, која се своди

на одређивање вероватноће реализације одређеног догађаја, као и дефинисање периода реализације. Спровођење анализе да ли је систем фрагилан на одређену врсту стресора, може довести до значајних закључака о систему, као и о самом процесу превенције дефинисаног ризика. Фрагилност је дефинисана као нелинеарна реакција на линеарно повећање нежељеног стресора.

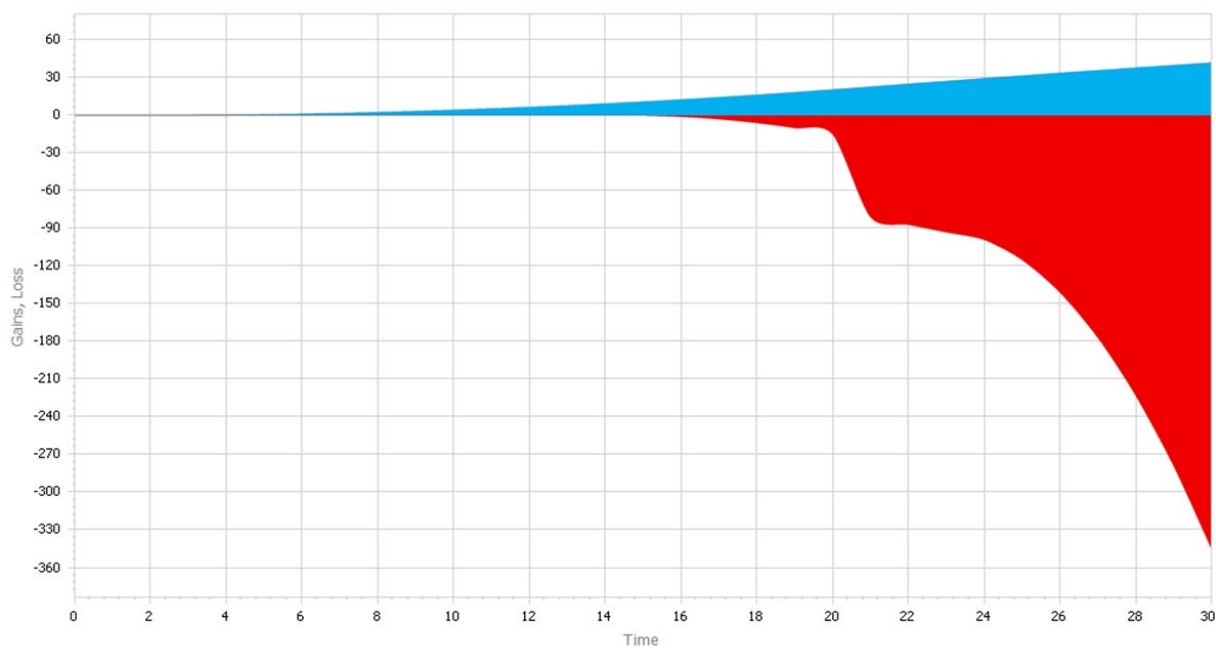
Код фрагилних система, приликом линеарног повећања нежељеног стресора, долази до наглог повећања губитака и потенцијалног краха система. Фрагилни системи се често дефинишу као високо оптимизовани системи који се налазе у недостатку резервних капацитета. Супротност наведеном феномену су биолошки системи, попут људског тела, које има висок степен резервних капацитета, тако да у случају да одређени орган или део органа откаже, целокупни систем може наставити са функцијом (Taleb, 2012). Код примера људског тела, битно је назначити да сегменти овог система тј. органи, нису у сваком тренутку под максималним оптерећењем, већ да постоји одређена количина резервних капацитета. Системи који имају висок степен резервних капацитета који се често дефинишу као "вишак" (*idle capacity*), значајно боље подносе нагле промене од система који су високо оптимизовани.

Након што је систем или део система дефинисан да је фрагилан, очекивано је дефинисање процеса који би елиминисао изложеност система датом ризику, или изградио резервне капацитете који имају функцију заштите система од наглих промена. Ако је систем изложен стресору који може донети велике губитке или тотални колапс система, спровођење cost-benefit анализа није препоручено. Такође, треба избегавати било какву анализу или стратегију која није искључиво фокусирана на редукацију фрагилности система (Taleb, et al., 2014).

Главна карактеристика фрагилних система је њихова реакција на нежељене интерне или екстерне промене. Ови системи генеришу нелинеарне губитке када су изложени волатилношћу, застојима, наглим променама или континуалном утицају неког стресора. Очекивано понашање система је генерисање конкавних падова у перформансама, приликом линеарног повећања интензитета стресора (Jovičić and Mačuzić, 2019).

На Слици 4.4 приказано је нелинеарно понашање фрагилног система приликом линеарног повећања нежељеног стресора. Плавом бојом је приказано линеарно повећање стресора, док су црвеном бојом приказани генерисани губици система.

Феномен фрагилности се може објаснити кроз логистички пример саобраћаја у урбаном окружењу, тј. загушења и застоја који могу да настану. Потребно време да се прође жељена рута у урбаном саобраћају, има конвексан облик понашања у односу на повећање броја аутомобила који користе дату руту. Претпоставимо да анализирани систем има оптимални капацитет протока од 1000 возила/сату/траци. У сценарију у којем би се оптимални капацитет протока пробио за 10%, повећање у потребном времену путовања, да се пређе жељена рута, не би било линеарно повећано за 10%, већ би се време путовања по датом рути потенцијално повећало за 50% (Taleb, 2012).



Слика 4.4 Нелинеарно понашање фрагилног система

Фрагилност система посебно се може увидети у здравственом сектору. Док се код већине система губици могу лако исказати кроз финансијске параметре, губици здравственог система се испољавају кроз повећање медицинских грешака, времена процесирања пацијената и повећања морталитета. У случају наглог дуплирања пријема пацијената, што се може очекивати у сценарију пандемије или природне катастрофе попут земљотреса, поплаве или урагана, преоптерећење здравственог система не би било линеарно дуплирано у броју медицинских грешака, већ би повећање броја медицинских грешака било и до пет пута веће (Clancy, 2015).

4.5. Хеуристички приступ у анализи фрагилности система

Предвиђања у управљању ризиком могу бити заснована на квантитативним величинама дефинисаним на основу: економетрике, вероватноће, статистике или пак на параметрима заснованим на хеуристичком приступу. Статистички приступ управљања ризиком је прихватљив уколико је усвојен тачан модел, док се код хеуристичког приступа управљању ризиком осетљивост система може идентификовати, чак и у случају да се користи погрешан модел расподеле вероватноће (Taleb, 2011). Дакле, хеуризам се према Талебу (2011) може описати следећом констатацијом: „Погрешним лењиром нећемо измерити тачну висину деце, али ћемо временом установити да ли деца расту“.

Циљ хеуристичког приступа у управљању ризиком је развој методологије за идентификацију скривених ризика у систему, који су последица појаве неочекиваних стресора (Taleb, 2009, 2010; Haug and Taleb, 2011). Суштински, овом методологијом тежи се да се дефинише осетљивост система на неизвесност, јер

постојање неизвесних догађаја је реално стање без обзира колико је систем контролисан (Makridakis and Taleb, 2009).

Талеб и Голдштајн (Taleb and Goldsteine, 2012) показали су да је велики број система, почев од природних па све до банкарских, здравствених и финансијских, изложен неочекиваним догађајима који се не могу предвидети на основу регресионе анализе великих база претходно сакупљених података. Ти случајни догађаји могу бити малог интензитета, али због постојања претходне акумулације утицаја стресора на систем, они могу довести до неочекиваног краха система.

Хеуристички облик анализе ризика је заснован на идентификацији фрагилности као фактора ризика у систему или антифрагилности и робусности система (Taleb, 2012). Процена фрагилности, тј., колико крајњи ризици могу бити добро „ухваћени“ (идентификовани) заснована је на нумеричком стрес тесту (stress test).

Хеуристички приступи могу бити базирани на: обради емпиријских података, примени статистичке анализе у процени вероватноће појаве фрагилности, као и у употреби експерименталних резултата.

Предност хеуристичке методе (Taleb and Martin, 2012) огледа се у могућности примене концепта на малом броју сценарија (исхода), за разлику од неких других конвенционалних метода где је за добру поуздану процену исхода неопходна велика база података. Уместо да се користи процена ризика на основу тренутне вредности исхода, хеуристичком методологијом се прати ток узастопних исхода са циљем да се идентификује потенцијална нелинеарност њихових промена у времену, тј. њихова акумулација утицаја на систем (Taleb, 2012).

Акумулација утицаја негативних стресора на систем се прати преко степена нелинеарности одговарајућих функција. Степен те нелинеарности у развоју догађаја уједно је и директна мера фрагилности система на разматрани ток догађаја. Као мера нелинеарности усваја се конвексност/конкавност у расподели величина стања. Скаларна величина којом се мери конвексност естимационе функције фрагилности система је и мера фрагилности целог система (Taleb, 2018).

На овај начин могуће је извршити процене појаве фрагилности у случају такозваних „тихих ризика“ (Taleb and Martin, 2012; Taleb, 2015), чијим нагомилавањем може доћи до ситуација који се више не могу компензовати регулаторним мерама. За процену фрагилности, а самим тим и фактора ризика неопходно је развити алат који подразумева вишесценаријску анализу (Taleb et al., 2016).

4.5.1 Предвиђање фрагилности, антифрагилности и робусности

Предвиђање је научни приступ који треба да олакша доношење одлука и одговарајућих акција, са циљем да се на адекватан начин могући ризици сведу на минимум (Makridakis, 1981; 1982). Дакле, добрим предвиђањем треба

дефинисати ниво ризика у процесу доношења одлука, тј. неопходно је одредити процену тачности у предвиђању и процену грешака које су последица одбацивања мање извесних догађаја (Makridakis and Hibon, 2000). Такође је важно, приликом предвиђања у процени ризика, направити селекцију које податке треба, а које не треба узети у обзир, тј. који су догађаји мање, а који више извесни.

Хеуристички приступи могу бити базирани на: обради емпиријских података, примени статистичке анализе у процени вероватноће појаве мање извесних (тзв. неизвесних) резултата, као и у употреби експерименталних резултата. У хеуристичком приступу анализе фрагилности, она се суштински сматра као акумулирана, тј., наслеђена особина система.

Управљање ризиком засновано на хеуристичком приступу, које је предложио Талеб (2011; 2012), базирано је на математичкој формулацији фрагилности и антифрагилности. Под појмом фрагилности може се означити „осетљивост“ система на варијације стресора услед неизвесности, тј. услед догађаја који је неочекиван (тј., одбачен као мање извешан).

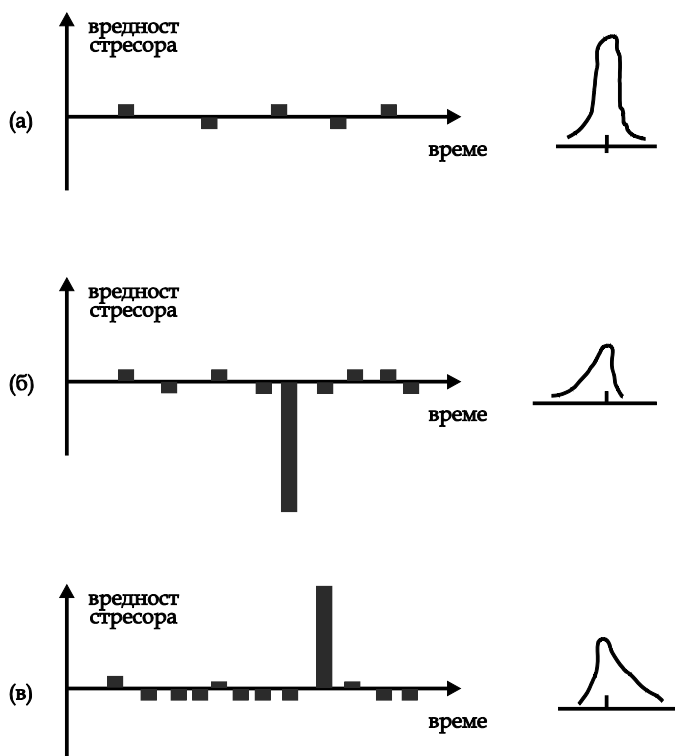
Као што је у претходном тексту већ наглашено, под појмом антифрагилности могу се назвати „бенефити“ и адаптације у систему које настају под утицајем неочекиваних догађаја. Дакле, фрагилност и антифрагилност су инверзне појаве у систему. Као трећи појам уводи се робусност, који се квалитативно описује као неосетљивост система на неизвесност. На основу претходног, врши се подела система на фрагилне, антифрагилне и робусне.

Талебов хеуристички приступ у процени ризика заснива се на детекцији фрагилности у посматраном систему, чак и у случају да се користи погрешан модел, тј., погрешно изабрана функција расподеле вероватноће. Дакле, овај приступ се не заснива на мерењу тачне вредности утицаја, већ на идентификацији тренда фрагилности у систему услед дејства неизвесног догађаја. Да би процена развоја фрагилности система на дати ток догађаја била добра, потребно је да резултати (исходи) који се анализирају овом методом буду мерени на исти начин.

4.5.2 Хеуристичка класификација система на основу карактеристика дистрибуције вероватноће стресора

У тексту који следи илустрована је подела система на фрагилан, антифрагилан и робустан, и то на основу анализе параметара који карактеришу дистрибуцију стресора. Уобичајени параметри којима се често приказују карактеристике расподеле неке величине су параметар *skewness* (закривљење) и *kurtosis* (спљоштеност). Упоредна илустрација Талебовог концепта робусног, фрагилног и антифрагилног система са осталим појмовима система описана је на Слици 4.5.а÷в.

На Слици 4.5.а приказан је робустан/резилијентан систем. Систем је изложен позитивним и негативним стресорима који су релативно мали, тј. у равнотежи.



Слика 4.5 Подела система на основу изложености позитивним и негативним стресорима а) робустан; б) фрагилан; в) антифрагилан

Робустан систем карактерише симетрична ($skewness=0$), уска дистрибуција вероватноће, $kurtosis > 3$, (број позитивних стресора већи од броја негативних) са кратким реповима. Овакву расподелу имају високо контролисани системи са малом неизвесношћу. Екстремни случај контролисаног система је систем чији се стресори могу описати стандардном нормалном дистрибуцијом ($skewness=0$, $kurtosis=0$).

На Слици 4.5.б приказан је фрагилан систем. Овај систем није контролисан, јер је учесталост негативних (непожељних) стресора знатно већа од учесталости позитивних (пожељних). Дакле, у координатном систему стресор-време, за анализу робустности/фрагилности система доминантни су стресори у IV квадранту, што се директно манифестује у појави знатно дужег левог репа расподеле вероватноће, у односу на десни реп и искривљености дистрибуције на лево ($skewness < 0$). Дакле, овакви системи имају значајан пик близу средње вредности, нагло опадајући десни реп и значајно дужи леви реп дистрибуције од десног ($kurtosis > 3$) (Слика 4.5.б). Оваква расподела стресора се јавља код фрагилних система.

На Слици 4.5.в приказан је антифрагилан систем. Екстремни стресори (велике амплитуде - интензитета) су позитивни, појављују се у I квадранту координатног система стресор-време и директно се манифестују у појави знатно

дужег десног репа расподеле вероватноће у односу на леви реп. Овакви системи имају значајан пик око средње вредности, нагло опадајући леви реп и значајно дужи десни реп од левог.

На основу претходне анализе може се извршити прелиминарна процена да ли је систем под дејством познатих стресора фрагилан или антифрагилан и да ли ће неки неизвесни догађај великог интензитета (велике негативне амплитуде) довести до краха система. Такође, претходне илустрације дају објашњење зашто се у хеуристичкој анализи фрагилности користи искључиво леви, а не десни реп расподеле вероватноће стресора.

Као што је наглашено, анализа статистичке робусности система добра је ако је усвојен тачан модел. Са друге стране, хеуристички приступ управљању ризиком се заснива на детекцији фрагилности, чак и у случају да се користи погрешан модел расподеле вероватноће.

Дакле, у овом приступу, циљ је да се установи да ли у изложености система неочекиваним стресорима, испод усвојеног прага разматрања фрагилности K постоји фрагилна тенденција.

4.5.3 Општа форма функције за процену фрагилности система

Основа хеуристичког приступа у анализи ризика је формирање естимационе функције фрагилности $\varphi(x)$ (*shortfall* или *payoff* функција) система. Нелинеарност у естимационој функцији фрагилности указује на постојање осетљивости система због дејства одређених стресора.

Под неизвесношћу, приликом хеуристичког управљања ризиком, подразумева се неочекиван догађај који се у дијаграму дистрибуције вероватноће стресора налази испод усвојеног прага K . Параметар K се назива: прагом разматрања фрагилности, прагом за оцену фрагилности или прагом неизвесности. Сви догађаји испод овог прага сматрају се мање извесним. Дакле, управљање ризиком засновано на хеуристичком приступу назива се K -фрагилност, јер је неопходно дефинисати праг неизвесности догађаја. Уобичајено је да се доњи праг за анализу фрагилности усваја као -3σ или -6σ у зависности колики ниво неизвесности се усваја, где је σ стандардна девијација нормалне Гаусове расподеле.

Генерализовано естимациона функција фрагилности $\varphi(x)$ може се назвати и функцијом за процену осетљивости система. Општа форма ове функције може се написати у облику:

$$\varphi(x) = \int_D \eta(x)f(x)dx. \quad (4.1)$$

Може се приметити да се нелинеарност функције $\varphi(x)$ дефинише одговарајућим избором функције $\eta(x)$. За једноставан случај $\eta(x) = 1$, функција $\varphi(x)$ постаје очекивана вероватноћа за случајну променљиву X . Ако функција исплативости зависи од простог очекивања, усваја се $\eta(x) = x$, тако да функција

за процену фрагилности постаје очекивана вредност случајне променљиве X : $\varphi(x) = E[x]$. Уобичајено је да се у случају финансијских предвиђања усваја линеарни облик функције $\eta(x)$. У Табели 4.1 дат је приказ избора функције $\eta(x)$, у зависности од области у којој се хеуристичка процена фрагилности примењује.

Табела 4.1 Избор функције $\eta(x)$ у зависности од области примене (Taleb, 2009)

Линеарна функција: $\eta(x) = x$	Нелинеарна функција: $\eta(x) = (x^2, x^3)$
<ul style="list-style-type: none"> · Финансијски сектор: улагање без задуживања · Предвиђања очекиваног: очекивани недостатак; · Опште управљање ризиком; · Економија (политика); · Безбедност; · Тероризам; · Природне катастрофе; · Епидемије; · Шпекулација (казино) 	<ul style="list-style-type: none"> · Исплативост деривата; · Динамички заштићен портфељ; · Портфељ са појачањем око тачке губитка; · Исплативост кубних функција; · Грешке у анализи волатилности; · Калибрација нелинеарних модела; · Очекивана тежина нелинеарне користи; · Позиционирање засновано на Куртосису (Трговина волатилношћу);

У претходној релацији функција $f(x)$ представља функцију густине расподеле вероватноће тј., pdf функцију. У Табели 4.2 дат је приказ функције у зависности од изабраног типа дистрибуције.

Табела 4.2 Pdf функција $f(x)$ у зависности од изабраног типа дистрибуције (Тадић и сар., 2014)

Функција	Нормална Гаусова [μ, σ]	Пуасонова (λ)	Експоненцијална (λ)
$f(x)$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$	$\lambda e^{-x\lambda}$
	Мешовита Гаусова (за стохастичку волатилност)	Студент T(3)	Студент T(4)
$f(x)$	$p \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}} + (1-p) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_2^2}}$	$\frac{6\sqrt{3}}{\pi(x^2 + 3)^2}$	$12 \left(\frac{1}{x^2 + 4} \right)^{5/2}$

Хеуристички приступ фрагилности посматраног система заснива се на анализи нелинеарности естимационе функције фрагилности $\varphi(x)$ у случају неизвесности, тј., појаве неизвесног догађаја у оквиру K домена.

Уобичајено је да се на основу класичних тестова, заснованих на статистичким теоремама, уводи праг значајности у дистрибуцији вероватноће

случајних догађаја, и да се одбацују догађаји који су испод задатог прага значајности. У оквиру овог приступа управо се разматра утицај неизвесног стресора велике амплитуде на систем. Неизвесност се усваја тако да се разматрани догађај налази испод конвенционалног прага значајности.

4.5.4 Дефинисање трансфер функције фрагилности

Процена фрагилности система на неизвестан стресор врши се естимацијом левог репа дистрибуције података (Слика 4.5.б). Док се за процену робусности врши естимација десног репа дистрибуције података (Слика 4.5.в). Ово су у суштини једносмерни тестови.

Основна хипотеза на којој је заснована теорија хеуристичке фрагилности је да проучавани негативни стресор, који се налази испод прага K , може довести систем у стање фрагилности, посебно уколико је амплитуда (интензитет) тог стресора знатно већа од интензитета осталих стресора (Taleb, 2018).

Појава фрагилности указује како систем трпи варијацију стресора, при чему је стресорни догађај стохастичан и налази се на левом репу расподеле вероватноће. Процена фрагилности се заснива на варијацији естимационе функције $\varphi(x)$. Двоструком варијацијом естимационе функције фрагилности $\varphi(x)$ добија се трансфер функција фрагилности H^s .

Дакле, дефинисање фрагилности у овом приступу је двојако. Прво се разматра унутрашња фрагилност, варијацијом функције фрагилности $\varphi(x)$ по средњој девијацији s^- на левом репу расподеле. Спољна фрагилност се односи на варијацију функције фрагилности $\varphi(x)$ по стресору X испод прага фрагилности K . Уобичајена је опција да се анализа врши на скали вредности испод прописане значајности, праг фрагилности је уобичајено мањи од прага значајности (Taleb, 2018).

Обзиром да се фрагилност анализира на левој страни расподеле вероватноће стресора, фрагилност се може третирати као акумулирана тј. наслеђена особина система.

Дакле, на основу претходног, може се закључити да се фрагилност у овом приступу дефинише као нелинеарност у мапирању левог репа дистрибуције стресора. Овај приступ се своди на формирање трансфер функције H^s пертурбацијама другог реда функције фрагилности по варијацији девијације s^- и по стресору X на левом полудомену. Испитивањем вредности трансфер функције H^s дефинише се да ли је систем фрагилан или не.

Општа форма трансфер функције K -фрагилности (Taleb and Douady, 2013) може се написати у облику:

$$H^s(K, s^-) = V_{s^-}' / V_{s^-} \quad \forall K < \Omega \quad (4.2)$$

где је: Ω средња вредност дистрибуције; K – праг за оцену фрагилности на левом полудомену дистрибуције; V_{s^-} Вега осетљивост функције φ на левом полудомену дистрибуције вероватноће стресора X .

Вредност девијације s^- на левом полудомену дефинише се као:

$$s^- = \int_{-\infty}^{\Omega} (\Omega - x) f(x) dx \quad (4.3)$$

где је: $f(x)$ – функција расподеле густине вероватноће (Табела 4.2). У случају Гаусове расподеле $\Omega \equiv \mu$ као и $s \equiv \sigma$.

Док се општи израз за функцију естимације фрагилности на левом полудомену испод прага K , за изабрану случајну променљиву X , ($X < K$) може се написати у облику:

$$\varphi(K, s^-) \equiv \int_{-\infty}^K (\Omega - x) f(x) dx \quad (4.4)$$

Претходна релација може се трансформисати у облик:

$$\begin{aligned} \varphi(K, s^-) \equiv (\Omega - K) \int_{-\infty}^K f(x) dx + \int_{-\infty}^K (K - x) f(x) dx \equiv \\ (\Omega - K) F_{(s^-)}(K) + E_{(s^-)}(X < K) \end{aligned} \quad (4.5)$$

где је први сабирак $(\Omega - K) F_{(s^-)}(K)$ пропорционалан вероватноћи да случајна променљива X има вредност K , док други сабирак представља очекивану вредност, тј., математичко очекивање $E_{(s^-)}(X)$, када је случајна променљива испод прага фрагилности ($X < K$).

4.5.5 Дефинисање Вега функције осетљивости применом методе коначних разлика

У циљу дефинисања трансфер функције H^s , уведена је Вега („Vega“) функција осетљивости система V_{s^-} као варијација функције фрагилности φ по s . Вега осетљивост се анализира на левом репу дистрибуције вероватноће испод изабране вредности прага фрагилности K . На тај начин се варијацијом функције фрагилности φ по s^- формира фамилија функције фрагилности (Слика 4.6).

У практичним случајевима и анализама осетљивости система најчешће функција φ није глатка (континуална) по s^- , у том случају неопходно је за прорачун применити методу коначних разлика.

Нека се дистрибуција случајне променљиве X , која се налази испод прага фрагилности ($X < K$), може описати фамилијом pdf функција $f_n(x)$ где је $n \in I \subset \mathbb{R}$. Нека се апсолутна девијација може дефинисати на истој фамилији pdf функција $f_n(x)$ у облику:

$$s_n^- = \int_{-\infty}^{\Omega} (\Omega - x) f_n(x) dx. \quad (4.6)$$

Претпоставља се да је пресликавање $n \rightarrow s^-(n)$ континуално и растуће у домену $\mathbb{R} \in [0, +\infty)$, $n \in I$, тако да апсолутна девијација s^- на левом полудомену дистрибуције има инверзну функцију $n(s^-) : \mathbb{R} \rightarrow I$, дефинисану као $(s^-(n))^{-1} = n(s^-)$, где $s^- \in \mathbb{R}$.

У случају да је $x = s^-$, функција фрагилности добија вредност $\varphi(\Omega, s^-) \equiv s^-$. Претпоставља се да је функција $\varphi(K, s^-)$ диференцијабилна на левом полу домену $(-\infty, \Omega]$.

Вега осетљивост на левом полудомену испод прага K , ($K < \Omega$), при вредности девијације $s^- > 0$, и за изабрану pdf функцију $f_n(x)$, дефинише се у следећем облику:

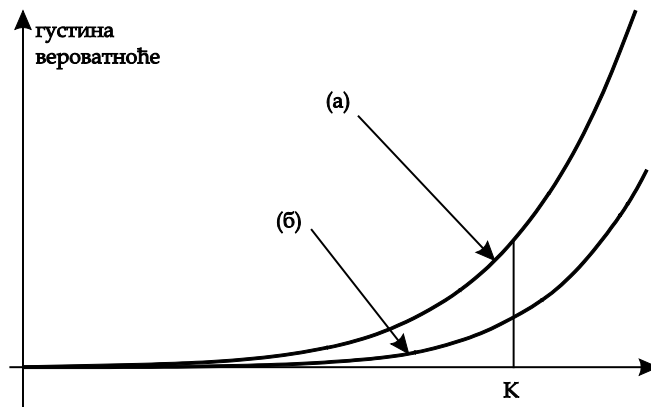
$$V(X, f_n, K, s^-) = \frac{\partial \varphi(K, s^-)}{\partial s^-} = \left(\int_{-\infty}^K (\Omega - x) \frac{\partial f_n(x)}{\partial x} dx \right) \left(\frac{ds^-}{dn} \right)^{-1} \quad (4.7)$$

Вега осетљивост функције $\varphi(K, s^- \pm \Delta s)$ на опсегу $2\Delta s$, применом методе централних коначних разлика може се написати у облику:

$$V(X, f_n, K, s^-, \Delta s) = \frac{1}{2\Delta s} (\varphi(K, s^- + \Delta s) - \varphi(K, s^- - \Delta s)) = \int_{-\infty}^K (\Omega - x) \frac{f_{n(s^- + \Delta s)}(x) - f_{n(s^- - \Delta s)}(x)}{2\Delta s} dx, \quad (4.8)$$

где се интеграција може разложити на два сабирка:

$$\begin{aligned} \varphi(K, s^- \pm \Delta s) &= (\Omega - K)F_{n(s^- \pm \Delta s)}(K) + E_{n(s^- \pm \Delta s)}(K) \\ F_{n(s^- \pm \Delta s)}(K) &= \int_{-\infty}^K f_{n(s^- \pm \Delta s)}(x) dx \\ E_{n(s^- \pm \Delta s)}(K) &= \int_{-\infty}^K (K - x)f_{n(s^- \pm \Delta s)}(x) dx \end{aligned} \quad (4.9)$$



Слика 4.6 Варијација естимационе функције фрагилности на левом полудомену расподеле вероватноће за: а) $\varphi(K, s^- + \Delta s)$ и б) $\varphi(K, s^- - \Delta s)$

Вега функција осетљивости $V(X, f_n, K, s^-, \Delta s)$ дефинише склоност ка конвексности естимационе функције.

Варијација естимационе функције фрагилности $\varphi(K, s^- \pm \Delta s)$ на левом полудомену расподеле при датом прагу фрагилности K приказана је на Слици 4.6.

4.5.6 Дефинисање трансфер функције фрагилности применом методе коначних разлика

Парцијални извод вега функције фрагилности може да се дефинише по параметру K или по параметру s^- . Након дефинисања вега функције фрагилности $V(X, f_n, K, s^-)$ дефинише се њена спољашња варијација V' . Варијацијом вега функције по параметру K , добија се такозвани дрифт (drift) фрагилности или склоност (тј., скретање) ка фрагилности (Taleb, 2019):

$$V'(X, f_n, K, s^-) = \frac{\partial^2 \varphi(K, s^-)}{\partial K \partial s^-} \quad (4.10)$$

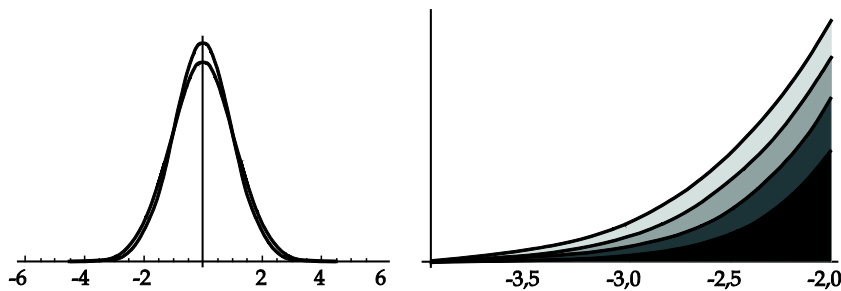
С обзиром да је за:

$$K = \Omega: \varphi(\Omega, s^-) \equiv s^- \text{ и } V(X, f_n, \Omega, s^-) = 1. \quad (4.11)$$

Дрифт фрагилности уједно представља меру којом брзином се фрагилност удаљава од почетне вредности 1 када се параметар K удаљава од Ω (Taleb, 2019). Дакле, дрифт фрагилности представља први извод вега функције по параметру K :

$$V'(K, s^-) = \frac{\partial V(K, s^-)}{\partial K} \quad (4.12)$$

Као што је наглашено, фрагилност се може идентификовати повећањем конвексности на левом полудомену расподеле (Слика 4.7).



Слика 4.7 Илустрација утицаја повећања стандардне девијације на леви полудомен Гаусове расподеле густине вероватноће

Стога је неопходно испитати знак функције $\varphi(K, s^-)$, тражењем другог извода ове функције по параметру s^- . Дакле, фрагилност другог реда може се дефинисати и у облику:

$$V''(X, f_n, K, s^-) = \frac{\partial^2 \varphi(K, s^-)}{(\partial s^-)^2} \quad (4.13)$$

Много бољи индикатор фрагилности је параметар V' , при варијацији по Δs , јер овај параметар директно утиче на експонент функције којом се дефинишу вредности у репу расподеле тј., на домену $(-\infty, K]$.

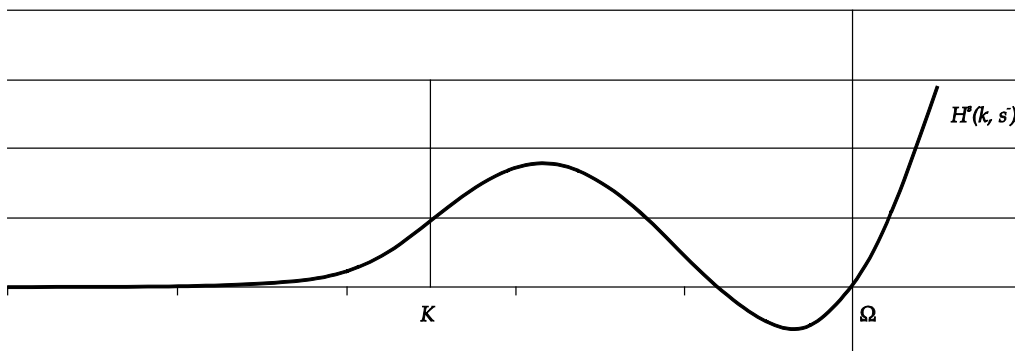
У случају практичне анализе фрагилности стрес тестовима, где су познате дискретне вредности стресора, нелинеарност на левом репу расподеле може се дефинисати применом методе коначних разлика. У том случају трансфер функција $H(\Delta s)$ дефинише конвексност Вега функције фрагилности (Taleb, 2011):

$$H(\Delta s) \equiv \frac{V(X, f, K, s + \Delta s) + V(X, f, K, s - \Delta s)}{2V(X, f, K, s)} \quad (4.14)$$

На основу претходног следи да за случајну променљиву X систем има следеће карактеристике:

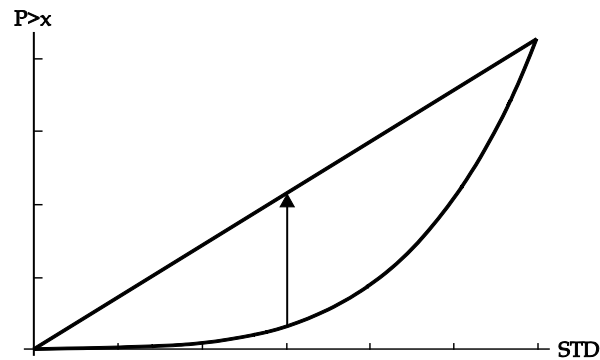
- $H(\Delta s) > 1$ фрагилан,
- $H(\Delta s) < 1$ антифрагилан,
- $H(\Delta s) = 1$ робустан.

На Слици 4.8 дат је приказ опште форме трансфер функције $H^s(K, s^-)$ стрес теста на левом полудомену расподеле стресора.



Слика 4.8 Општа форма трансфер функције за различите параметре дистрибуције случајне променљиве у стрес - тесту

Општа форма трансфер функције може да има екстремне вредности, као и да мења знак. Испод прага фрагилности трансфер функција асимптотски тежи нули што указује на неосетљивост система на стресоре из те зоне. Зоне у којима је $H^s(K, s^-) > 1$ указују на конвексност, којом се манифестује нелинеарност на левом репу расподеле. Илустрација конвексности преко дискретних вредности неке функције дата је на Слици 4.9.



Слика 4.9 Конвексност Вега функције осетљивости система

Суштинска одлика хеуристичке методе је та да није неопходно имати праву дистрибуцију вероватноће да би хеуристичка процена била тачна, јер се овом методом мере ефекти другог реда и потенцијална изложеност (експозиција) догађајима на левом репу расподеле. Дакле, чак и погрешно изабрана дистрибуција кроз пертурбацију показује праву експозицију система случајном догађају. У томе лежи највећи део снаге ове методе (Taleb, 2018) у односу на друге уобичајено коришћене мере ризика, као што су: cVAR, „очекивани недостатак“ („expected shortfall“), тестирање на стрес и сличне методе.

4.5.7 Псеудоалгоритам за процену фрагилности у стрес – тесту

Предложени стрес - тест ризика не захтева велики број података, и као такав већ има препоруке од стране Међународног монетарног фонда за примену у процени ризика пословања у макроекономијама, као и у пословању великих банкарских система (Taleb et al., 2016). Псеудо алгоритам се може описати следећим корацима:

1. Избор pdf (Табела 4.2) као и домена нумеричког прорачуна, тј., горње границе K на левом репу расподеле. У случају да је изабрана Гаусова расподела, усваја се: $\Omega \equiv \mu$, $s \equiv \sigma$.
2. Одређивање функције V за дату вредност случајног стресора X где $X \in (-3\sigma, K]$. Функција V се дефинише пертурбацијом вредности стандардне девијације σ , за $\pm\Delta\sigma$, у оквиру функције фрагилности φ , где је $\Delta\sigma = k\sigma$, $k < 1$. Дакле, пертурбацијом на опсегу $\sigma \pm \Delta\sigma$ у функцији фрагилности φ добија се функција осетљивости V у дискретном облику:

$$V(X, f, K, \Delta\sigma) \equiv \frac{\varphi(X, f, K, \sigma + \Delta\sigma) - \varphi(X, f, K, \sigma - \Delta\sigma)}{2\Delta\sigma}, \quad (4.15)$$

3. За сваку вредност случајне променљиве $X \in (-3\sigma, K]$ дефинише се трансфер функција $H(X \pm \delta_n)$, где је δ_n изабрани инкремент раста на опсегу $(-3\sigma, K]$. Трансфер функција се дефинише применом методе коначних разлика у облику:

$$H(X \pm \delta_h) \equiv \frac{V'}{V(X)} \quad (4.16)$$

$$V'(X \pm \delta_h) \equiv \frac{1}{2}((V(X + \delta_h) + (V(X - \delta_h)))$$

где су $V(X \pm \delta_h)$ вредности функције осетљивости за вредности стресора $(X - \delta_h, X, X + \delta_h)$. Са δ_h је означен пертурбациони интервал на домену $(-3\sigma, K]$.

4. Провера вредности H функције, тј идентификовање да ли постоји праг фрагилности анализираних система.

Уколико је при изложености система стресору X добијена вредност трансфер функције $H = 1$, може се рећи да је систем робустан. Ако је при изложености стресору X остварено $H < 1$ систем је антифрагилан на тај стресор. У случају да је $H > 1$ систем је фрагилан при изложености система на стресор X .

Пошто се у овој методологији мере ефекти другог реда на левом репу дистрибуције вероватноће, није неопходно имати „праву“ дистрибуцију вероватноће да би хеуристика била тачна у процени потенцијалне експозиције разматраном стресору.

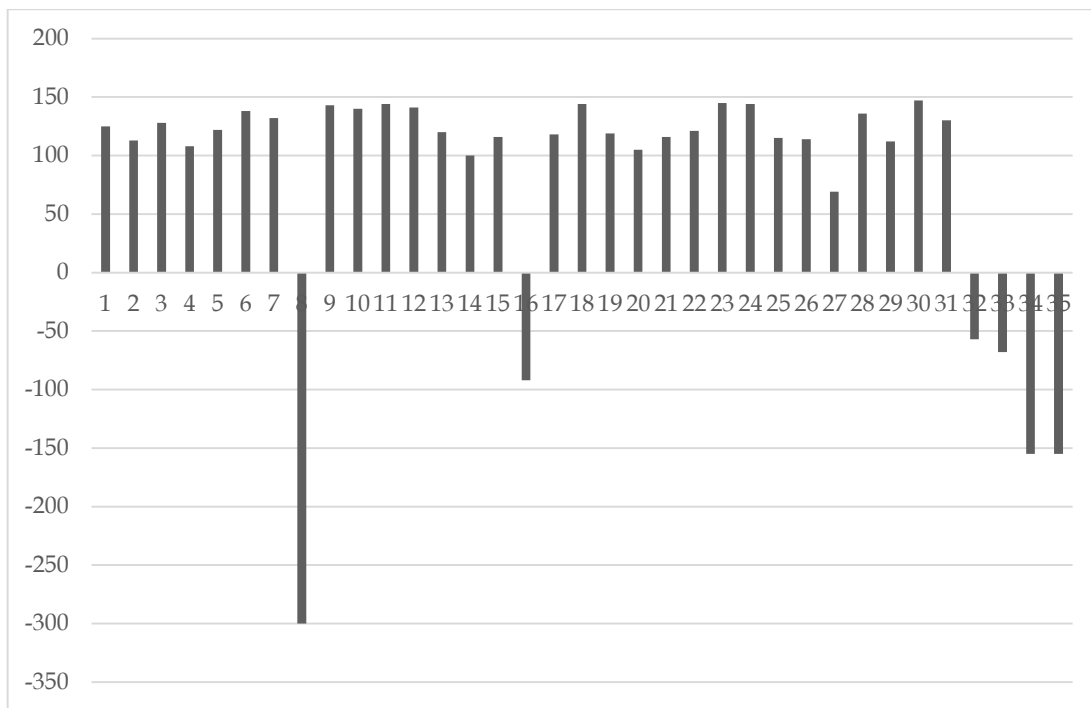
Дакле, применом одговарајуће пертурбације на левом репу расподеле овом методом приказује се права експозиција, тј., изложеност система случајном догађају, тј., анализираним стресору. Такође, у овој методи се не захтева посебна параметризација на моделу, сем адекватног избора корака δ_h и вредности $\Delta\sigma$.

4.5.8 Симулација стрес - теста фрагилности заснованог на хеуристичком приступу

За илустрацију претходно изложене хеуристичке методологије процене фрагилности, анализиран је систем изложен стресорима, приказаним на Слици 4.10. Претпоставља се да негативни стресори изазивају фрагилност система, стога се ради стрес - тест на левом репу расподеле вероватноће.

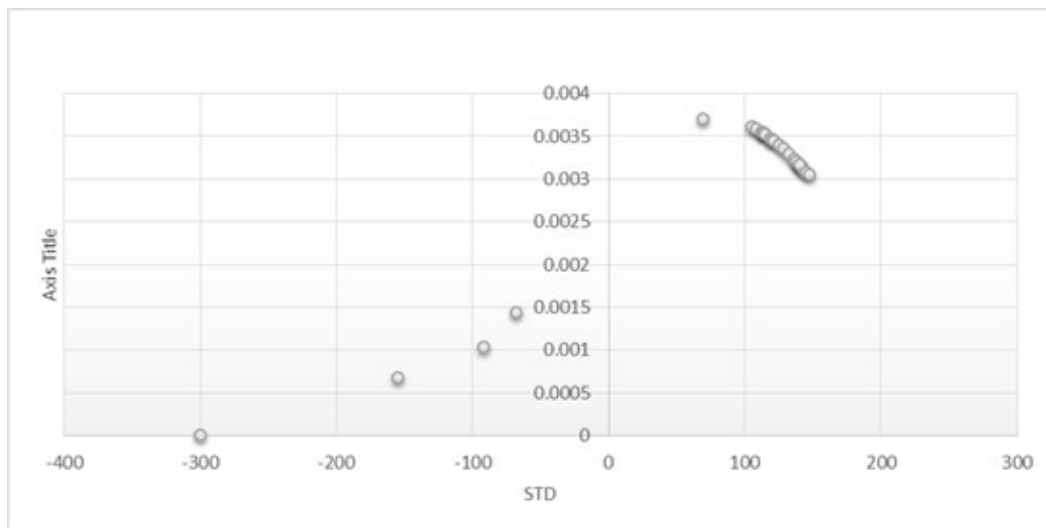
На слици 4.11 приказана је Гаусова расподела густине вероватноће стресора, која даје прелиминарну слику модела. За податке приказане на претходној слици, добијени су $skewness=-2.2$ и $kurtosis=4.34$, који указују на расподелу са доминантним издуженим левим репом ($kurtosis>3$), што указује и на неопходну анализу случајних догађаја у IV квадранту.

Расподела показује знатно већи број позитивних стресора. Екстремна вредност негативног стресора у овом случају била је $X = -300$. Међутим, негативни стресори (Слика 4.11) дали су расподелу густине вероватноће са знатно дужим левим репом расподеле ($skewness = -2.2$). Стрес - тест хеуристичког приступа фрагилности рађен је на домену $X \in [-3\sigma, K]$, где је праг стрес теста K дефинисан као $K = \mu - \sigma$. У конкретном примеру, са Сlike 4.11, $\mu = 79,37$ док је $\sigma = 107,16$.

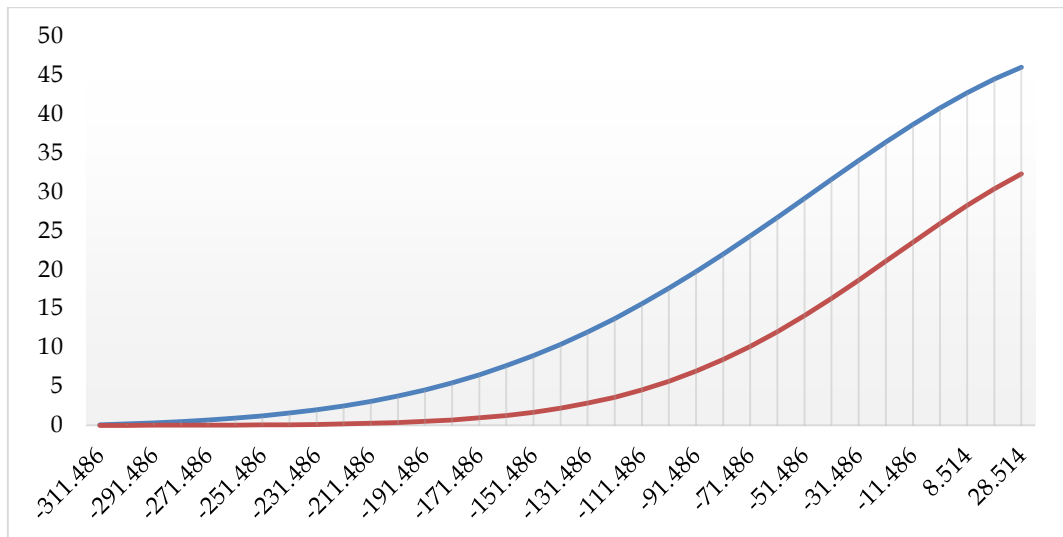


Слика 4.10 Расподела стресора система са $skewness=-2.2$ и $kurtosis=4.34$

На Слици 4.12 приказане су естимационе функције фрагилности дефинисане за варијацију стандардне девијације $\Delta\sigma = \pm 15\%$. Ове функције су искоришћене за дефинисање Вега функције осетљивости система (Слика 4.13) у оквиру стрес - теста.

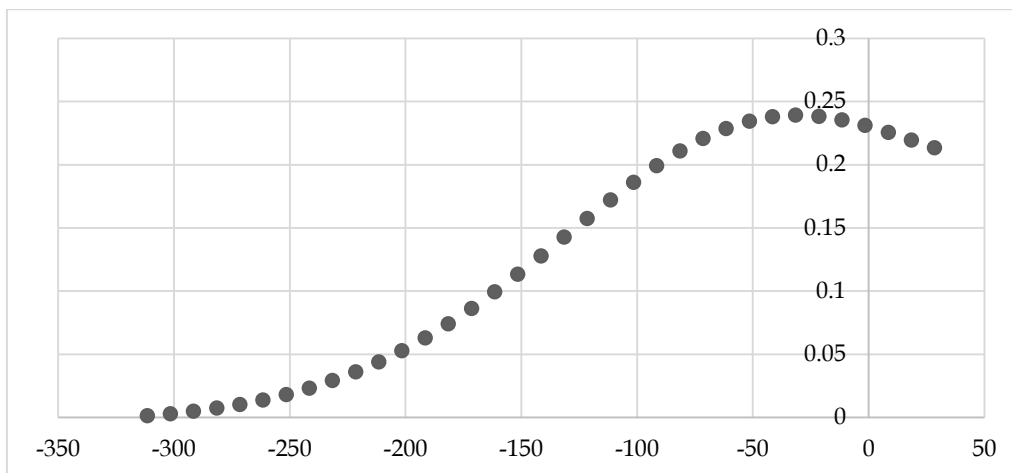


Слика 4.11 Расподела густине вероватноће за анализирани стрес - тест



Слика 4.12 Естимационе функције фрагилности израчунате за варијацију стандардне девијације $\Delta\sigma = \pm 15\%$

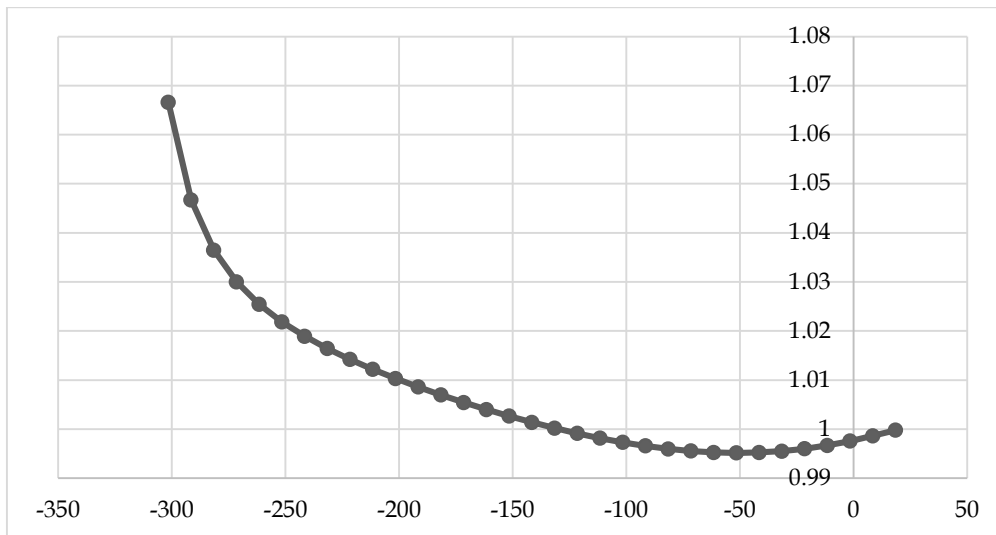
На Слици 4.14 приказана је трансфер функција фрагилности добијена варијацијом вега функције применом методе коначних разлика. На основу анализе извршене стрес - тестом добијена трансфер функција указује да за вредност стресора $X \leq -130$ долази до појаве фрагилности у систему.



Слика 4.13 Вега функција осетљивости система након изложености система стресорима приказаним на Слици 4.10

Као што је приказано на Слици 4.14, стресор интензитета од $|X = -131.486|$, који је скоро три пута мањи од екстремне вредности стресора којем је систем био раније изложен, довешће до фрагилности система. Дакле, свака вредност испод идентификоване границе фрагилности од $K_f = -131.486$ довешће до појаве нестабилности, тј., фрагилности у систему.

Оваква појава се може објаснити чињеницом да се хеуристичким стрес тестом врши акумулација утицаја претходних стресора, и тиме је омогућена анализа утицаја знатно мањих стресора негативног интензитета на систем.

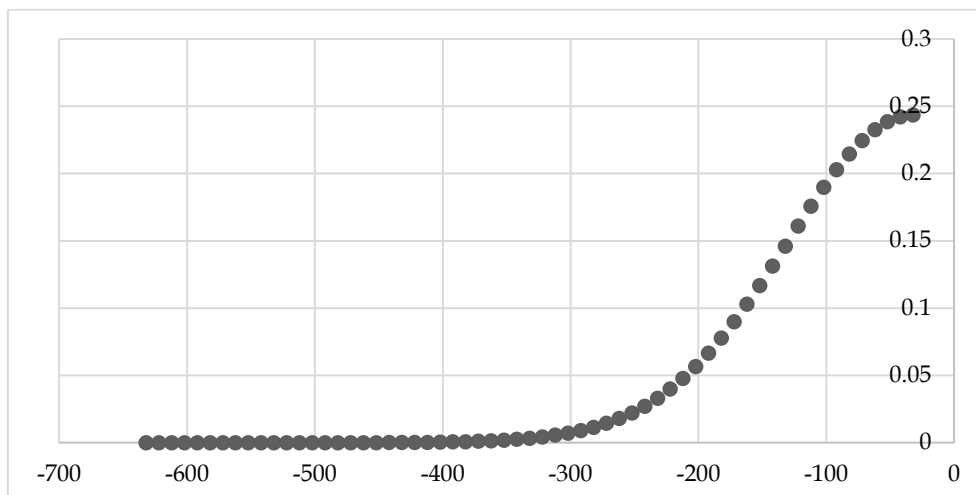


Слика 4.14 Трансфер функција фрагилности на домену интеграције $[-3\sigma, K]$

4.5.9 Утицај избора домена интеграције на добијени праг фрагилности у стрес - тесту

Уколико се у претходном стрес - тесту уместо домена интеграције $[-3\sigma, K]$ усвоји домен $[-6\sigma, K]$ добија се вега функција осетљивости и трансфер функција, које су приказане на Сликама 4.15 и 4.16, респективно.

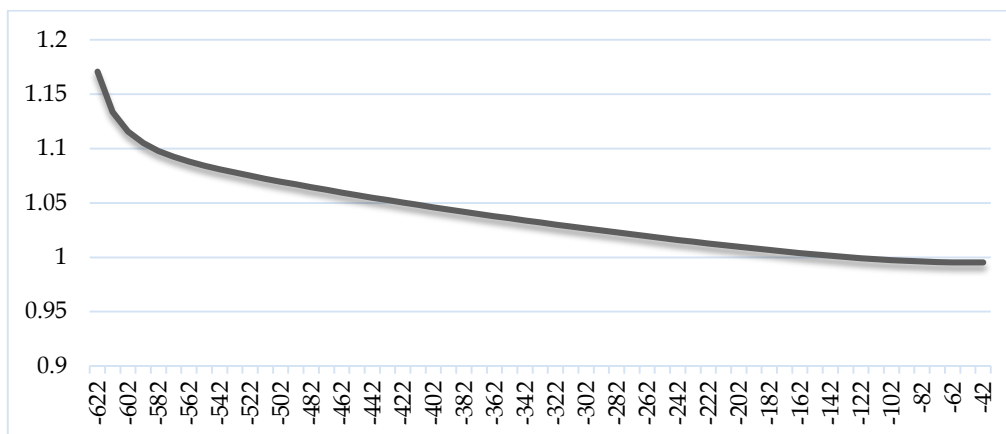
На домену интеграције $[-6\sigma, K]$ добијен је праг фрагилности $K_f = -132.245$ (Слика 4.15). Док је у претходном случају, на домену интеграције $[-3\sigma, K]$ $K_f = -131.486$ (Слика 4.14). Добијена разлика у прагу фрагилности на стресор је незнатна, што указује да је усвојени инкремент интеграције био довољно мали.



Слика 4.15 Вега функција осетљивости у стрес тесту на домену интеграције $[-6\sigma, K]$

Анализа која је претходно извршена указује да догађаји у систему који иницирају стресор интензитета од $X \approx -130$ (који је претходно изложен

стресорима приказаним на слици 4.10) су догађаји са тихим ризиком, чијим нагомилавањем може доћи до ситуација који се више не могу компензовати регулаторним мерама.



Слика 4.16 Трансфер функција фрагилности за изабрани домен интеграције од $[-6\sigma, K]$

Дакле, као што је приказано у претходном примеру, хеуристичким приступом анализе фрагилности узима се у обзир акумулирано дејство свих стресора на систем и идентификује се карактер утицаја конкретне вредности стресора. Такође, овом методом могуће је квантитативно одредити вредност стресора испод које систем постаје фрагилан. Треба нагласити да ти случајни догађаји могу бити малог интензитета, али због постојања претходне акумулације утицаја негативних стресора на систем, они могу довести до неочекиваног краха система.

4.6. Симулација фрагилности заснована на концепту прага перкулације

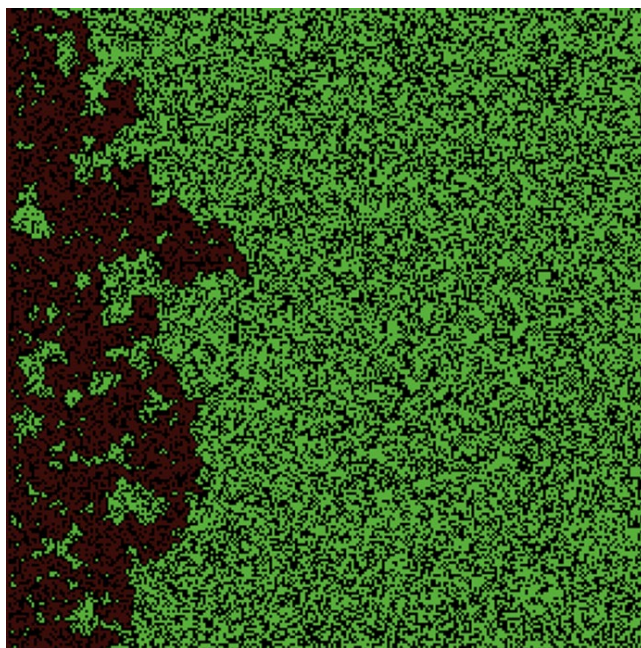
Један од кључних начина за дефинисање употребљивости одређене методе, је сагледавање да ли је анализирана метода или концепт, интердисциплинаран у својој примени. Алати за анализу ризика, уз очекиване адаптације према анализираном проблему, морају имати одређени степен интердисциплинарности.

Математички концепт који ће бити предмет даљег истраживања, није имао широку примену изван еко-биолошких симулација. Међутим, овај концепт може бити коришћен у сврхе анализе фрагилности система. У питању је концепт Прага Перкулације - ПП (Percolation threshold) или концепт критичног прага. Наведени концепти имају широку примену у сферама физике, математике и инжењерства (Stauffert, et al., 1994). Иако ови концепти нису нашли широку примену у анализи социо-економских система, развој симулационих технологија попут симулација заснованих на агентима, омогућава да концепти попут критичног прага буду лако примењени и за ове системе. Као што је претходно

назначено, динамика система и симулације засноване на агентима се често користе у комбинацији, како би се обухватили различити нивои апстракције.

Симулације засноване на агентима могу симулирати концепт прага перкулације без комбиновања са другим симулационим методологијама. Концепт прага перкулације је дефинисан кроз феномен где мале промене у једној варијабли система изазивају нагле, нелинеарне и често неочекиване промене унутар целог система (Wilensky and Rand, 2015). Функционисање овог феномена унутар комплексног система може се приказати кроз упрошћени модел пожара заснован на агентима (Wilensky, 1997).

За модел је коришћен оригинални програмски код, као и НетЛого (NetLogo) симулационо окружење (Wilensky, 1999). Циљ модела је да симулира ширење пожара шуме у виртуелном простору. Симулација ширења пожара се одвија у ћелијском простору (cellular automata), тако што пожар означен црвеном бојом шири свој простор и заузима ћелије зелене боје које представљају дрвеће, као што је приказано на Сликама 4.17 и 4.18.



Слика 4.17 Симулација пожара у дефинисаној густини шуме од 59%

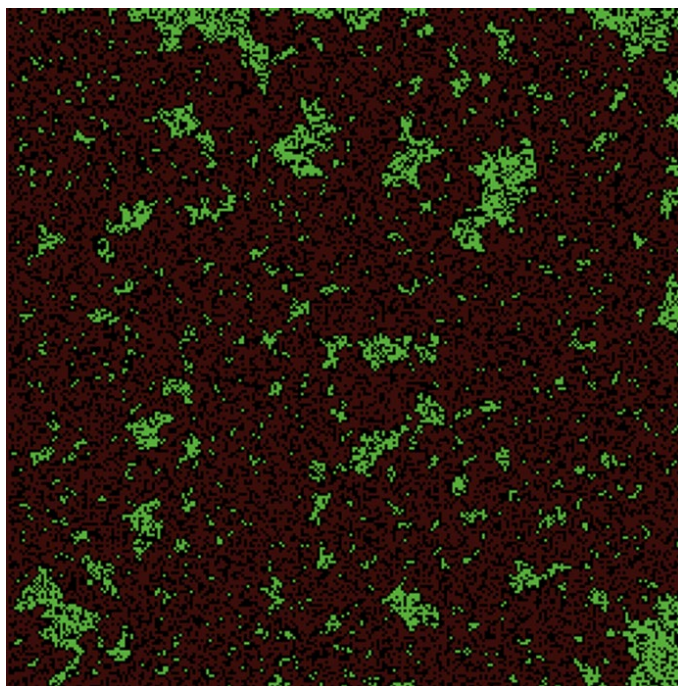
Креирани модел има за циљ да покаже нелинеарност у повећању сагорелог простора у функцији густине шуме. Модел представља добар пример како линеарно повећање нежељеног стресора може узроковати генерисање нелинеарних губитака. Оригинални програмски код за симулацију не дозвољава манипулацију простора који пожар може да покрије, али је могуће мењати густину виртуелне шуме. У креираном моделу, ниска густина шуме испод 50% генерише једноцифрене процентуалне губитке у сагорелим јединицама шуме.

Први већи губици у сагорелој површини се генеришу са постављањем густине шуме на 59%, као што је приказано на Слици 4.17.

Слика 4.17 представља приказ сагореле шуме у случају да је густина виртуелног простора постављена на 59%. Модел по својој структури је базиран на агентима што га чини стохастичким. На Слици 4.17 је приказана највећа могућа сагорела површина која износи 18.6%, у случају густине простора од 59%. У случају повећања густине шуме са 59% на 61%, добија се драстично већи степен губитка шуме под утицајем пожара, као што је приказано на Слици 4.18.

Са малим повећањем густине шуме од 2%, модел генерише значајно већу сагорелу површину, која на Слици 4.18 износи 82%. Иако је модел стохастичан, приликом пуштања великог броја симулација, ка циљу проналажења најнижег процента губитака шуме, креирани модел не генерише резултате приближне сценарију где је густина зеленог простора постављена на 59%.

Креирани модел представља добар приказ феномена фрагилности, кроз коришћење концепта критичног прага, као и симулација заснованим на агентима. Такође, концепт критичног прага није обрађен у постојећој литератури везаној за фрагилност система. Сам концепт може бити користан у дефинисању фрагилности једноставнијих система, као што је приказано у претходно дефинисаном моделу.



Слика 4.18 Симулација ширења пожара при густини од 61%

Модел ширења пожара указује и на важност сагледавања кључног параметра фрагилности система. У претходно дефинисаном примеру, кључни параметар модела представља густина шуме у симулираном простору. Литература динамике система указује на феномен критичних параметара модела (*leverage points*) (Barlas, 2007), тј. да комплексни модели са повратним

петљама могу имати један или више интер-конектованих параметара, који при малим променама вредности, утичу на значајне промене у понашању целокупног модела.

Приликом утврђивања да ли је систем фрагилан, и у случају да је коришћена динамика система као главни алат за симулације модела, изналажење кључног параметра и његовог критичног прага може бити од великог значаја. Унапређење перформанси комплексних система, такође, може да зависи од једног кључног сегмента, као што је дефинисано теоријом ограничења (Goldratt, 1990).

5. СИМУЛАЦИЈА ФРАГИЛНОСТИ LEAN ЗДРАВСТВЕНОГ СИСТЕМА

Постоји широк спектар начина како се концепт фрагилности дефинише, моделира и анализира (Taleb and Douady, 2012). Током година, многе методе за анализу ризика које су се показале да добро функционишу у сферама финансијског сектора, нису пронашле примену у другим областима. Битно је назначити да код анализе фрагилности система, постоји доста флексибилности у адаптацији овог концепта да би био примењен на широк спектар система ван финансијског сектора. Медицински сектор се због своје комплексности показао као систем који је склон да буде фрагилан на нагле нежељене промене (Clancy, 2015). Имплементација анализе фрагилности код медицинских система може бити од велике користи у разумевању недостатака система. Такође, треба узети у обзир да централни део функционисања овог сектора чини људски фактор. Системи засновани на људском фактору и великом броју повратних петљи у кретању информација, имају тенденцију да буду неизвесни и нелинеарни у својој реакцији на нежељене догађаје. Социјални експерименти са симулационим моделима, указују да постојање простих повратних петљи кретања информација и присуство временских застоја унутар система, изазивају висок степен конфузије и доводе до доношења лоших одлука од стране људи, који покушавају да управљају системом (Sterman, 1989). Наведени феномен доношења лоших одлука од стране менаџмента због комплексности система, показао је високо присуство и у симулацијама здравствених система (Kleinmuntz and Thomas, 1987). Симулациони експерименти ове врсте су показали да учесници у експерименту, чак и у условима где добију комплетне податке о функционисању система, доносе лоше одлуке које стављају целокупни систем у велики ризик и генеришу непотребне губитке. Учестала појава оваквих симулација је да учесници који имају за циљ да максимизирају перформансе система, доводе да систем генерише велике губитке. Главни разлог за лоше доношење одлука у оваквим системима је присуство застоја између управљачке активности и реакције система, као и нелинеарност система када је изложен одређеним стресорима (Diehl and Sterman, 1995). Застоји у кретању информација, креирају акумулације грешака и повећавају фрагилност система. Све наведене карактеристике комплексних система који су коришћени у симулационим експериментима, присутне су и код медицинских система.

Једна од честих критика везаних за комплексност здравственог система, везана је и за имплементацију нових технологија и метода за повећање продуктивности, које врло често овај систем чине додатно фрагилним на нагле промене (Clancy, 2008). Имплементирање нових технологија је од велике важности за развој сваког система, међутим могућност да систем постане више комплексан и мање агилан према наглим променама, представља реалан ризик сваке технолошке имплементације (Goldratt, et al., 2017). Такође, овај сектор је показао склоност у остваривању високог степена оптимизације својих процеса и капацитета. По истраживањима то указује да су многи здравствени системи постали превише LEAN у својим операцијама, што их је учинило фрагилним на

нагле нежељене промене (Clancy, 2014). Иако је почетак 21. века обележио велики помак у иновацијама дијагностичких средстава, лекова и осталих медицинских решења, адекватно достављање медицинских иновација крајњем кориснику забележава стагнацију (Herzlinger, 2006). Велики део проблема у бољем достављању здравствених услуга крајњем кориснику у медицинским системима широм света, лежи у лошој организацији рада самог система. У многим случајевима недостатак добре организационе структуре, представља значајно већи фактор него недостатак људства или технологије. Неки од најразвијенијих здравствених система, које одликује високо присуство најсавременије технологије, као и најстручнијег медицинског особља, врло често бележе висок степен нежељених догађаја попут лекарских грешака, превасходно као ефекат недостатка алата за свакодневну митигацију оваквих ризика (Gehlbach and Artino, 2018).

Постоји вишедеценијска пракса у анализирању ефикасности здравствених система (Waring and Bishop, 2010), као и спровођења стратегија ка остваривању боље ефикасности здравствених система на свим оперативним нивоима (de Souza, 2009). Остваривање високог степена ефикасности система је од велике важности, међутим потенцијална опасност да систем постане фрагилан мора бити узета у обзир. Концепт резилантности на неизвесност и високо ризичне догађаје, постаје секундаран у процесу постизања високог степена оптимизације система. Постизање високе ефикасности система у краћем временском периоду може деловати као финансијски боља опција, али са друге стране проузрокује да систем дугорочно постаје више фрагилан на нагле промене (Sheffi, 2015). Здравствени системи поред тога што морају избегавати да постану фрагилни, превасходно треба да буду усмерени ка постизање стања анти-фрагилности. Избегавање понављања нежељених грешака у здравственом систему, може бити избегнуто кроз континуалну адаптацију и учење система, као и креирање резервних капацитета, као у случају анти-фрагилних система.

5.1. Моделирање пандемије

Са појавом Covid-19 пандемије за коју се сматра да је започела крајем 2019. и почетком 2020. године, глобални здравствени системи су се суочили са низом проблема у својим свакодневним операцијама. Ови системи су показали фрагилност на нагле промене, као и недостатак капацитета да се систем адаптира према тренутним потребама. Дисрупција здравствених система се манифестовала кроз неколико оперативних ризика: велики број заражених здравствених радника који даље шире заразу, недостатак капацитета за пријем и третирање пацијената и велики број људских грешака у третирању пацијената, што проузрокује даљи пораст морталитета третиране болести. Сви наведени оперативни ризици указују на велики степен фрагилности здравственог система на неизвесне догађаје, као и на потенцијално висок степен оптимизације система ка смањењу трошкова и повећању ефикасности, где је изгубљен “резервни капацитет” (redundant capacity). Наведени проблеми у здравственом систему наводе и на преиспитивање интегритета метода за анализирање ризика и планирање, који су присутни у здравству дуго низ година (Hubbard, 2020).

Такође, битно је исказати да велики број здравствених установа, као и већих здравствених система, ретко или неадекватно спроводи било какве анализе за боље планирање и елиминацију грешака у свакодневном раду (Gawande, 2010). Неадекватна примена стандардизованих менаџерских метода за елиминацију људских грешака у свакодневном раду, додатно отежава спровођење било какве анализе ризика, као и даљу митигацију. У случају Covid-19 пандемије очекивано је да недостатак примене адекватних алата за планирање и анализу ризика, доводи здравствени систем неадекватно припремљен за високо утицајан нежељени догађај.

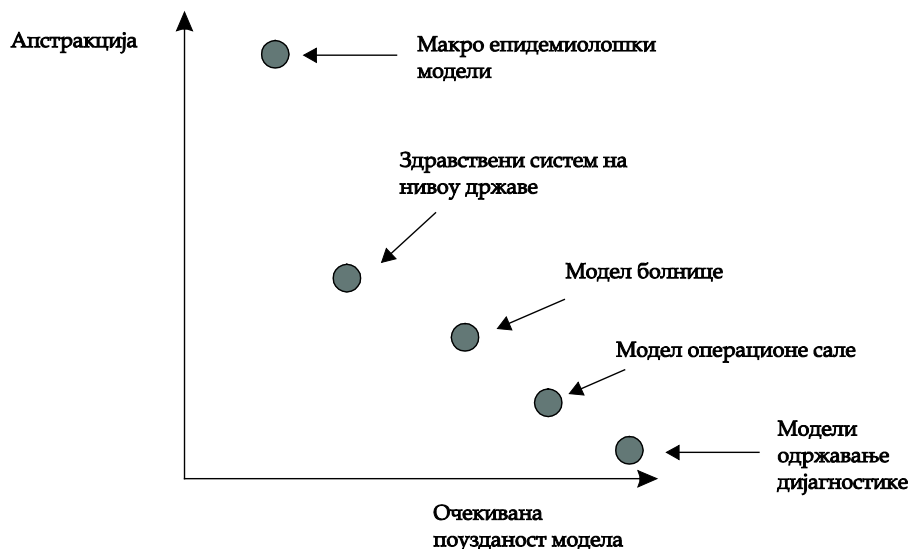
Висок степен заражених здравствених радника, у условима пандемије, може се дефинисати као један од кључних параметара који указује на лошу припремљеност здравственог система да се носи са догађајима високе неизвесности попут пандемија.

У случају Covid-19 пандемије висок степен инфекције код здравствених радника је забележен у раним фазама пандемије, као и недостатак у адекватном планирању ка превенцији даљег ширења заразе у здравственом систему (Vandyopadhyay, et al., 2020). Битно је нагласити и постојање могућности ширења заразе унутар здравственог система ка пацијентима који су третирани за друге болести. Нежељени догађаји овог типа могу довести до драстичног пораста морталитета код третираних пацијената.

Други индикатор који указује на неадекватан менаџмент ризиком је недостатак средстава личне заштите који је есенцијалан за рад здравствених радника у епидемиолошким условима (Schuklenk, 2020). Висок степен у неспремности глобалних здравствених система да управљају ризицима условљеним Covid-19 пандемијом, указује да ови системи нису еволуирали под утицајем претходних високо утицајних епидемиолошких догађаја. 2003. године епидемија тешког акутног респираторног синдрома (САРС), указала је на низ недостатака глобалних здравствених система. Када се епидемија САРС-а проширила на више од 20 држава, многи здравствени системи су показали систематску неспремност да третирају оболеле пацијенте (Pack, et al., 2004). У неким од најгоре погођених локација САРС епидемијом, попут Ханоја и Хонг Конга, од тоталног броја заражених, 46%-63% случајева су чинили здравствени радници (Twi, et al., 2003). Широк спектар ризика које је донела Covid-19 пандемија здравственим институцијама (Ran, et al., 2020), по својој структури и утицају нису значајно различити од фактора ризика који су били присутни са САРС епидемијом. Сходно томе, може се исказати потреба за бољим методама за управљање ризицима у здравственим системима. Као и постојање стандардизованих управљачких метода, које омогућавају систему да буде у стању континуалног учења и развоја продуктивности.

Постоји низ начина на који феномен пандемије може бити моделиран, где главни фактор у дефинисању модела представља ниво апстракције. Највиши ниво апстракције приликом моделирања нежељених епидемиолошких догађаја представља моделирање ширења пандемије на глобалном нивоу, тј. ширење заразе из изворне географске области на друге државе и континенте. Симулациони модели са порастом броја варијабли, експоненцијално губе

прецизност, као и генералну корисност у анализирању проблема (Forrester, 1987). Макро епидемиолошки модели, који обично обухватају највиши ниво апстракције, често су дефинисани као најмање корисни у симулирању потенцијалних сценарија. Како се ниво апстракције модела смањује, очекивана поузданост модела се повећава. Такође, модели са нижим нивоима апстракције, попут модела болнице, имају могућност да лако буду тестирани у односу на реални систем. Слика 5.1, приказује различите типове модела здравствених система, и њихову сегментацију по нивоу апстракције и очекиваној поузданости модела.



Слика 5.1 Сегментација модела по нивоу апстракције и очекиване поузданости модела

Макро епидемиолошки модели су често засновани на СИР (подложни, инфицирани и опорављени) структури, која је успостављена као основа за епидемиолошка моделирања (Weiss, 2013). СИР модели су у својој основи базирани на диференцијалним једначинама, и њихово моделирање динамиком система је учестало. Међутим, ови типови модела су се показали непоузданим у својим пројекцијама, и често изостављају кључну динамику ширења патогена, попут интеракције људи на локалном нивоу која се може моделирати агентима (Shen, Taleb and Bar-Yam, 2020).

Моделирање здравственог система на нивоу државе (Слика 5.1) представља изузетан изазов, сами модели ове врсте могу генерисати значајно корисније податке у односу на макро епидемиолошке моделе, али потребно је разумети велика ограничења ових модела. Иако се моделирање ширег здравственог система спроводи више од 40 година, јако је тешко истаћи било које значајне резултате ових модела у пракси, за разлику од симулација креираних за индустријске потребе (Brailsford, 2007). Креирање симулационог модела здравственог система државе или регије, може служити као алат за доношење боље управљачке политике, али ови типови модела захтевају још доста развоја,

као и ревизије приступа моделирању који се спроводи од 70-их година прошлог века.

Симулације здравствених система које имају изузетан потенцијал у креирању вредности, кроз повећање продуктивности и редукцију људских грешака, представљају модели на нивоу здравствених установа или болница. Имплементација метода попут теорије ограничења (Mabin, et al., 2018), LEAN методологије (Kovacevic, et al., 2016) и других стратегија за повећање продуктивности, показале су изузетне резултате приликом имплементације на нивоу једне здравствене установе или болнице. Примена симулационих метода на болнице, независно од LEAN или ТО стратегија, такође, може донети побољшања у перформансама попут времена процесирања пацијената (Narassima, et al., 2022). Комбиновање симулационих технологија са LEAN методама или теоријом ограничења, представља значајно ефикаснију опцију од појединачног имплементирања. Имплементација анализе фрагилности система на нивоу болнице, такође, представља оптимално решење. Анализа фрагилности може бити коришћена за усмеравање LEAN метода на најугроженији оперативни сегмент болнице или анализираних здравствених институције. Анализирање фрагилности на нивоу болница или националног здравственог система може генерисати корисне информације, међутим као што је претходно назначено, ови типови модела са собом носе низ ограничења.

5.2. Модел функционисања LEAN болнице у условима COVID-19 пандемије

Тешко је дефинисати да ли је COVID-19 пандемија за коју се сматра да је почела крајем 2019 године у Кини (Chen, et al., 2020), догађај који се може окарактерисати као црни лабуд. Постоји доста индикатора који усмеравају на закључак да COVID-19 пандемија није неочекиван догађај, у мери у којој је представљен. Један од индикатора је и често забележен низак степен безбедности у лабораторијама које се баве истраживањима најопаснијих патогена (Watts, 2004). Иако 2019/2020 пандемија COVID-19 (SARS-CoV-2) представља негативан догађај са низом непознатих параметара, претходне епидемије корона вируса се могу дефинисати као документовани ризици са познатом динамиком понашања. Такође, постоји и разумевање да појава сваке нове корона вирус епидемије представља догађај са високим негативним утицајем, као и релативно високим вероватноћом (Fehr and Perlman, 2015).

Битан параметар који наводи да COVID-19 пандемија није црни лабуд догађај на глобалном нивоу, је и сам регион у којем је пандемија започела. Регион данашње државе Кине, историјски представља високо ризичну средину везану за настанак високо утицајних епидемиолошких догађаја (Olshaker and Osterholm, 2017). Ако се узме пример често потцењене и високо присутне инфлуенце (грип) која представља акутну, инфективну и високо контагиозну болест. Инфлуенца је дефинисана као основа и "Тројански коњ" за потенцијалне будуће пандемије, где је дефинисан високи негативни утицај потенцијалне пандемије, као и

глобално низак степен припремљености (Gellin and Qadri, 2016). Сходно изнетим подацима, тешко је доћи до закључка да ли следећу пандемију корона вируса или инфлуенце, треба окарактерисати као прави црни лабуд догађај.

Здравствени системи на нивоу држава, COVID-19 пандемију, такође, не требају да класификују као црни лабуд догађај. Главни разлог за то је сличност у динамици понашања пандемије из 2020. године са претходним епидемиолошким догађајима. Сегмент за који COVID-19 пандемија представља неочекиван догађај са недостатком историјске интеракције фактора ризика и субјекта, је модернизована индустрија и сектор услуга. Под модернизованом индустријом и сектором услуга подразумевају се: високо оптимизовани ланци снабдевања, модерни производни системи, савремени саобраћај, хотелијерство и туризам. Ланци снабдевања у форми у којој тренутно функционишу у својој модерној историји, нису имали прилику да буду изложени дисрупцијама попут COVID-19 пандемије. Еволуција производних система, која је довела до концентрације великог удела светске производње на пар географски локација, такође представља нову структуру која није имала прилике да буде изложена већим глобалним дисрупцијама. За саме болнице оперативни ризици у условима пандемије су познати, као и есенцијална средства личне заштите.

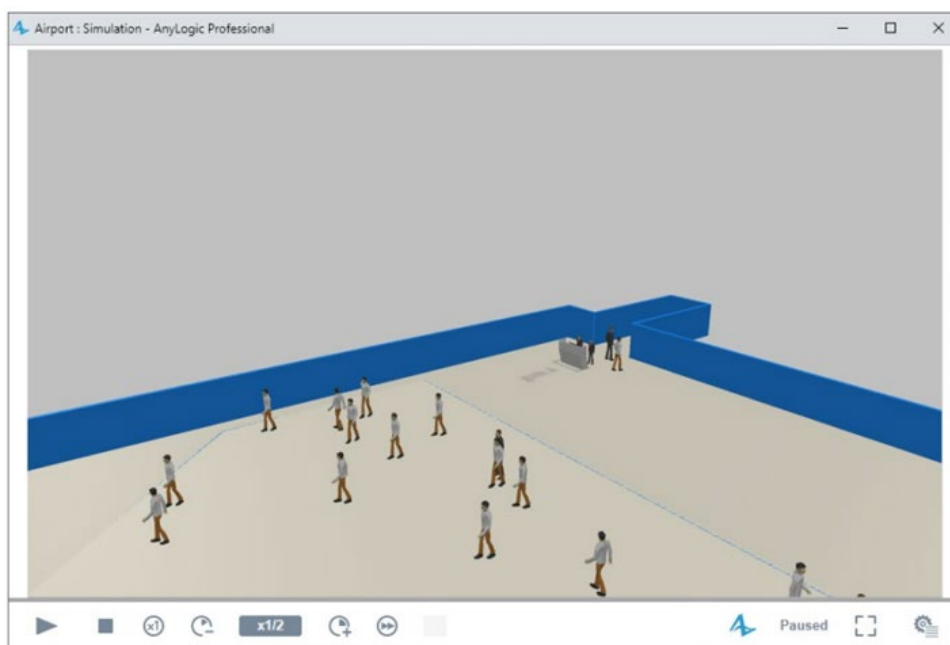
Кроз симулације може се утврдити бољи распоред медицинског особља у ванредним ситуацијама, попут сценарија где је већи број лекара заражен. Неки од првих предлога за симулационе моделе болница појављују се 60-их година прошлог века (Fetter and Thompson, 1965). Један од честих проблема који су предмет истраживања ових модела, је редукција времена чекања пацијената као и њихово време лечења.

Симулациони модели могу бити од великог значаја у анализи тренутног стања расположивих ресурса потребних за функционисање болничких система у епидемиолошком стању. Један од великих проблема у условима лоше имплементације LEAN филозофије, у оквиру здравствених система, је сагледавање капацитета и средстава за рад кроз форму производних капацитета и инвентара производа. Резерве средстава за рад у регуларним условима, не треба сагледавати као инвентар у обради залиха готових производа или залиха сировина, које треба смањивати због својих носећих трошкова или ниске утилизације. Инфраструктура и оперативни капацитети који су под ниском утилизацијом у производним окружењима могу бити окарактерисани као вишак, у одређеним условима. Међутим, у оквиру здравственог система, смањење ресурса или оперативних капацитета који тренутно немају високу утилизацију је високо ризична стратегија. LEAN системи код којих је управљање са ресурсима и залихама усмерено ка високом степену ефикасности, имају тенденцију да изазивају висок степен стреса код радника (Huo and Voxall, 2018). Стресно радно окружење у здравственом сектору доводи до повећања људских грешака од стране медицинског особља, и самим тим стопа морталитета се повећава (Gawande, 2010). Системи који су дефинисани као LEAN имају тенденцију да креирају радно окружење изузетно високог интензитета, које може имати низ психолошких последица по раднике (Huo, et al., 2022). Такође, LEAN методологија садржи низ алата за мониторинг свакодневних операција, са

циљем мапирања, визуализације и свакодневног праћења перформанси система. ЛЕАН имплементације у сектору услуга указују на потенцијалне ризике у агресивном мониторингу и честом анализирању перформанси радника, попут повећаног стреса у радном окружењу (Sprigg, Jackson, 2006). Сви наведени ризици могу значајно утицати на пад перформанси лекарског особља, као и на повећање стопе морталитета у болничком систему.

5.3. Приступи у креирању модела болнице

Приликом дефинисања граница модела болнице, битно је дефинисати ниво апстракције. Најнижи ниво апстракције може бити постигнут кроз коришћење симулација дискретних догађаја, попут библиотека расположивим у AnyLogic симулационој платформи (Frigoryev, 2022). Симулације дискретних догађаја могу бити од велике користи у случају да се анализира оптимална утилизација физичког простора и кретања људи. Слика 5.2 приказује кретање људи у виртуалном простору. Овај тип симулација се често дефинише као хибридни и обично обухвата комбиновање симулација: дискретних догађаја, симулације засноване на агентима и део симулације може да користи моделирање динамиком система. Симулационе библиотеке за кретање људи у виртуалном простору су у константном развоју због њихове корисности у логистичким и епидемиолошким апликацијама (Yang, Li and Zhao, 2014). Иако најнижи ниво апстракције болнице може донети низ закључака о анализираном систему, стратешко одлучивање често захтева другу форму дизајна симулације.



Слика 5.2 Моделирање и симулација кретања људи у виртуалном простору (Frigoryev, 2022)

За стратешке одлуке у здравственом систему, комбиновање симулација заснованим на агентима са динамиком система, може бити боље решење од

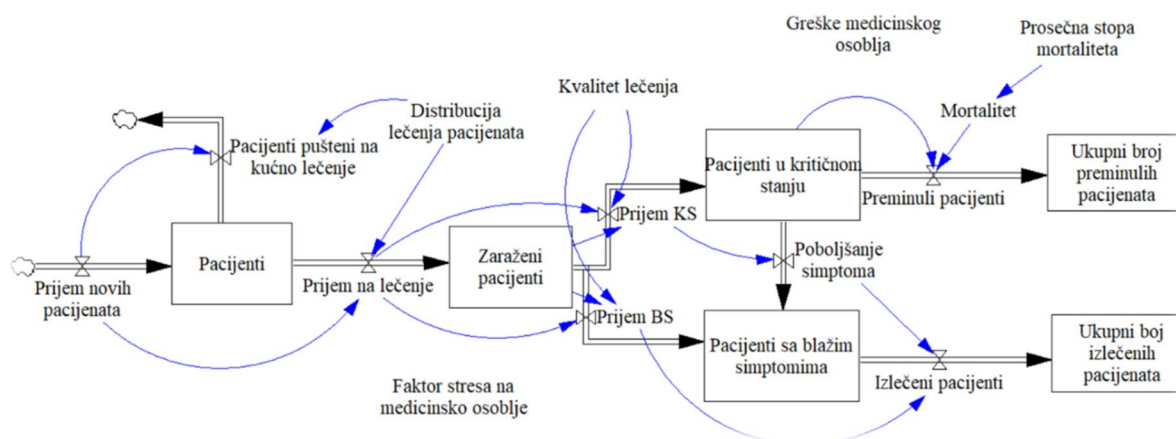
креирања модела који је превасходно заснован на симулацијама дискретних догађаја. У случају коришћења динамике система за симулацију болнице, неки од стратешких циљева који могу бити анализирани су:

- оптимизација перформанси ланца снабдевања болнице (Kochan, et al., 2018),
- оптимизација постојећих ресурса (Maliapen and Dangerfield, 2010),
- анализа спремности система у случају земљотреса (Khanmohammadi, Farahmand and Kashani, 2018) и сл.

Динамика система се често користи за стратешка планирања људских ресурса, попут планирања запошљавања нових кадрова, прераспodelу обавеза, боље управљање тимовима и сл. Динамика система представља оптималан приступ за анализу ризика здравственог система као што је болница.

5.3.1 Моделирање протока пацијената

За модел болничког система који има за циљ анализу фрагилности, као главна симулациона метода одабрана је динамика система. Динамички модел анализира пријем и лечење пацијената у условима COVID-19 пандемије. Кључни сегменти који дефинишу ефикасност система да адекватно третира пацијенте у симулираним условима пандемије су: расположивост лекарског особља, расположиви капацитети болнице и доступност средстава личне заштите. Највећи сегмент модела чини модел протока пацијената кроз болнички систем, приказан на Слици 5.3. Дефинисани сегмент почиње са дотоком Пријем нових пацијената у систем, и има три излаза: Пацијенти пуштени на кућно лечење, Преминули пацијенти и Излечени пацијенти.



Слика 5.3 Проток и лечење пацијената кроз болнички систем (Венсим софтвер)

Сегмент протока и лечења пацијената дефинишу четири нивоа, који представљају различите ступњеве лечења примљених пацијената. Ниво Пацијенти, је дефинисан дотоком пријема нових пацијената и одливом Пријем на лечење и Пацијенти пуштени на кућно лечење. Овај део модела дефинише пацијенте који су се појавили у здравственој институцији са симптомима COVID-19 вируса. Модел има упрошћену сегментацију пацијената који се примају на

лечење, док је оптимални приступ генерисање модела са коришћењем *arrays* функције. Под овом функцијом се подразумева генерисање више-димензионих карактеристика материјала који протиче кроз динамички модел. У случају болнице пацијенти би имали низ карактеристика, попут пола, годишта, хроничних обољења и сл. Сагледавање фактора ризика код COVID-19 пацијената може бити од значаја (Kwok, et al., 2020), међутим фокус овог модела је смештен на оптималну утилизацију болничких ресурса, и дефинисање различитих популација пацијената може донети непотребну комплексност у моделу. Већина примљених пацијената је пуштена на кућно лечење, док пацијенти који се налазе у лошијем здравственом стању и захтевају болничко лечење, прелазе у ниво Заражени пацијенти. Из нивоа Заражени пацијенти проток пацијената може бити усмерен на ниво Пацијенти у критичном стању или ниво Пацијенти са блажим симптомима. Одливи који врше сегментацију пацијената у овом делу модела су Пријем КС (даљи пријем због погоршања клиничког стања) и Пријем БС (даља прогресија лечења пацијената са блажим стањем).

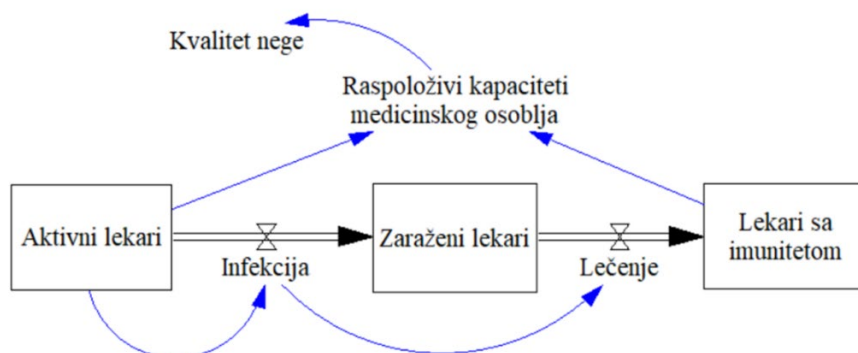
Каква прогресија очекује пацијенте који се налазе у нивоу Заражени пацијенти, дефинисана је кроз неколико фактора. Први фактор је епидемиолошког карактера, тако да модел ради сегментацију на пацијенте којима се клиничко стање погоршава током времена, и пацијенте са побољшањем клиничког стања. Пацијенти који се нађу у нивоу Пацијенти у критичном стању, могу бити одузети из нивоа кроз одлив Преминули пацијенти или кроз одлив Побољшање симптома. По својој структури овај део модела дефинише да пацијенти који су окарактерисани да имају лоше клиничко стање, уз адекватно лечење временом треба да заврше у нивоу Пацијенти са блажим симптомима. Варијабле које имају утицај на динамику кретања пацијената у овом делу модела су: Фактор стреса на медицинско особље, Грешке медицинског особља, Расположиви капацитет и Квалитет лечења. Промене у наведеним варијаблама, утичу на повећање или смањење морталитета пацијената који се налазе у нивоу Пацијенти у критичном стању. Такође, позитивне или негативне промене у наведеним варијаблама, утичу на смањење или повећање времена лечења пацијената у нивоу Пацијенти са блажим симптомима, као и повећању или смањењу времена које Пацијенти у критичном стању проводе у свом нивоу. Повећањеведеног времена у нивоу Пацијенти у критичном стању повећава број преминулих пацијената.

Структура модела, као и вредности варијабли су дефинисани кроз сагледавање низа већ постојећих симулационих модела, који анализирају проток пацијената кроз болничке системе у условима COVID-19 пандемије. Модел сагледава сегментације пацијената, као и ефекат расположивих болничких кревета на основу постојећих мулти-методолошких симулационих модела (Lu, et al., 2021). Сегмент модела који анализира проток и лечење пацијената кроз болнички систем (Слика 5.3), иако значајно комплекснији од традиционалних СИР модела, фундаментално је заснован на СИР структури која показује проток пацијената кроз нивое: подложни, инфицирани и опорављени пацијенти (Cooper, Mondal and Antonopoulos, 2020). Приликом одређивања параметара за стопе морталитета хоспитализованих пацијента, као и параметара времена

лечења, вредности су преузете из објављених прегледа литературе и мета анализа (Macedo, Gonçalves and Febra, 2021). Додатни сегмент модела, који може бити обухваћен, је и двосмерни проток пацијената између нивоа Пацијенти са блажим симптомима и Пацијенти у критичном стању. У тренутној структури пацијенти из нивоа Пацијенти у критичном стању могу циркулисати у ниво Пацијенти са блажим симптомима, док супротни смер протока није могућ. Додавање двосмерног протока, дефинише логику у моделу да пацијентима који имају блажу клиничку слику могу искусити погоршавање стања. Међутим, постоји недостатак података који указује на важност постојања овог протока.

5.3.2 Моделирање расположивих ресурса болнице

Динамички модел болнице обухвата и ефекте инфекције на расположиво лекарско особље. Овај део модела дефинише три нивоа и два протока. Нивои који одређују расположивост лекарског особља су: Активни лекари, Заражени лекари и Лекари са имунитетом. Стање у наведеним нивоима је дефинисано кроз протоке: Инфекција и Лечење (Слика 5.4). Овај сегмент модела има једноставну структуру, где активно лекарско особље у случају инфекције прелази у ниво лечења, и постаје поново активно након дефинисаног времена лечења.



Слика 5.4 Сегмент модела за прорачун расположивог лекарског особља (Vensim софтвер)

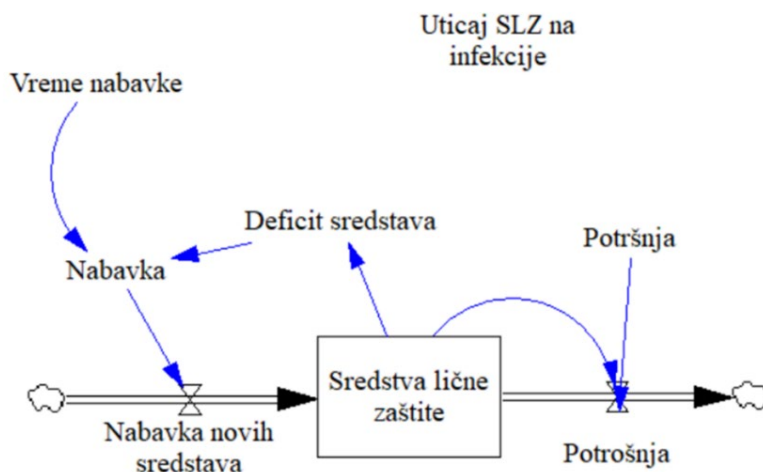
Сам модел анализира здравствени систем у периоду од пар месеци, у случају да је циљ модела анализа ефекта епидемије на лекарско особље у дужем временском периоду, сегмент модела са Сlike 5.4 захтева другу структуру. Модел претпоставља да имунитет лекара који су излечени траје више месеци, и самим тим није потребан проток између нивоа Лекари са имунитетом и иницијалног нивоа Активни лекари.

У случају да модел анализира период од више година, структура која дефинише трајање имунитета може бити пожељна и укључена у анализу. Протоци Инфекција и Лечење дефинишу динамику расположивости капацитета медицинског особља. Проток Инфекција је под утицајем параметара расположивости средстава личне заштите, расположивости капацитета болнице, као и екстерне варијабле за генерисање случајног броја. Најмањи утицај на

проток Инфекција има варијабла за генерисање случајног броја, док највећи утицај има расположивост средстава личне заштите. У случају да расположивост средстава личне заштите почне да опада, број инфекција између лекара експоненцијално расте, такође ефекат на инфекције има и однос повећања примљених пацијената на расположиво лекарско особље. Ефекти недостатка средстава личне заштите на инфекције у условима COVID-19 епидемије, дефинисани су на основу публикованих истраживања (Kutralam-Muniasamy, et al., 2022). У случају пада броја расположивог медицинског особља, где у исто време није дошло до смањења третираних пацијената, очекиван је и пад квалитета лечења и пораста фактора стреса на медицинско особље, што представља ефекат који је заснован на постојећим истраживањима (Clancy, 2015).

Планирање и оптимизација ограничених ресурса личне заштите у условима пандемије, може бити моделирано коришћењем динамике система (Sigala, et al., 2022). За потребе анализе расположивих ресурса болнице, креирани модел је заснован на једном нивоу који дефинише тренутно стање расположивих средстава личне заштите (Слика 5.5).

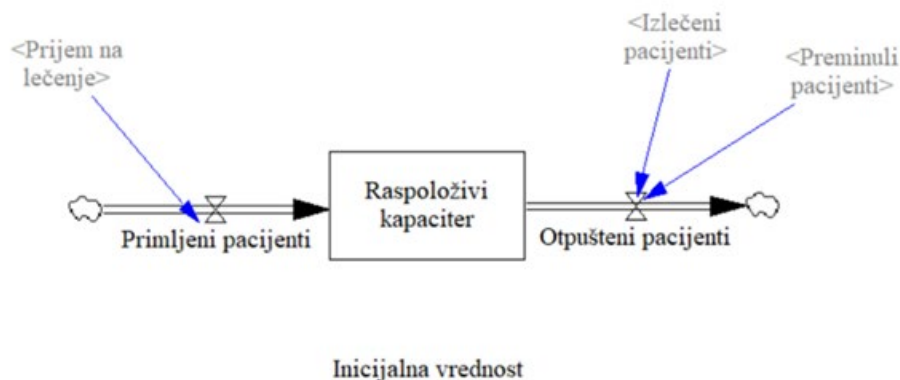
У случају да је за потребе модела релевантно направити разлику између различитих типова средстава личне заштите, модел може бити модификован да разликује различите типове ресурсних агената. У том случају сваки тип средстава личне заштите, попут респираторних маски или других епидемиолошких средстава, захтева да буде одвојено моделиран са дефинисаним животним циклусом заштите. За потребе модела болнице средства личне заштите су дефинисана у агрегатном стању, са линеарном потрошњом по активном лекару. У случају да ниво Средства личне заштите падне испод жељеног нивоа, започиње процес набавке нових средстава.



Слика 5.5 Симулација расположивости средстава личне заштите (Vensim софтвер)

Последњи сегмент модела прорачунава број расположивих кревета у болничком систему (Слика 5.6). Прорачун је заснован на стању нивоа Расположиви капацитет, који на почетку симулације има дефинисану

иницијалну вредност, тј. број пацијената који су већ били на болничком лечењу. Стање у нивоу Расположиви капацитет се мења кроз промене у дотоку Примљени пацијенти и одливу Отпуштени пацијенти. Стање Расположивих капацитета болнице директно утиче на варијабле које одређују квалитет лечења, као и на број заражених лекара.



Слика 5.6 Прорачун расположивих кревета у болничком систему (Vensim софтвер)

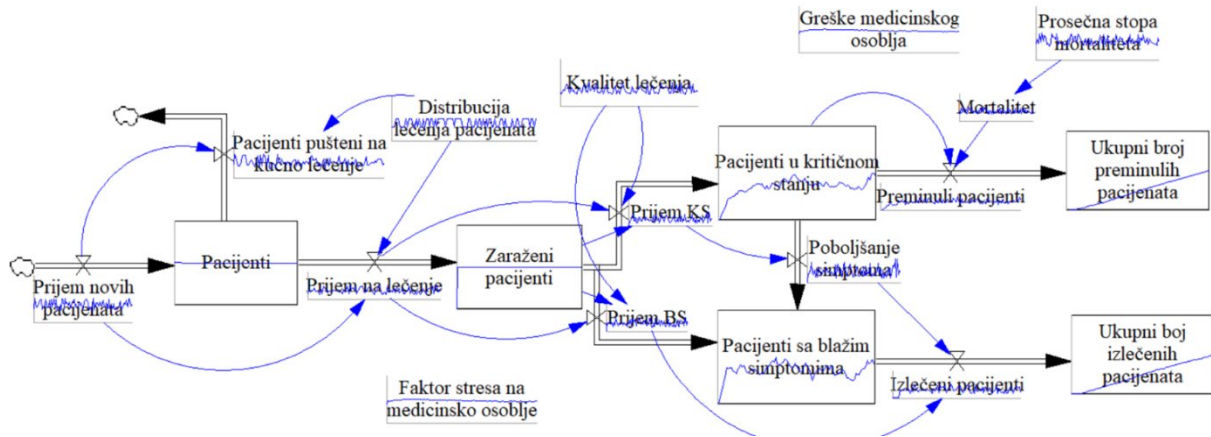
5.4. Резултати симулације

Приликом анализе ризика система употребом симулационих технологија, први корак процеса анализе представља генерисање базне симулације (base simulation run). Циљ овог корака је генерисање скупова података који могу бити коришћени за поређење са подацима генерисаним анализом ризика. Пре него што дође до генерисања базне симулације, модел мора проћи процес валидације. Спровођење процеса валидације модела је од изузетне важности у случају да је планирана употреба модела анализа која треба да укаже на екстремна стања система. За процес валидације коришћене су аутоматизоване могућности софтвера, засноване на Берласовом процесу валидације (Barlas, 1996), као и процес визуелне инспекције понашања различитих сегмената модела. Такође, модел је из Vensim софтвера пребачен у Ventity симулационо окружење, ка циљу спровођења анализа осетљивости које Ventity софтвер пружа. Сви релевантни налази модела су поређени са наведеним постојећим симулационим моделима који анализирају болнички систем.

5.4.1 Базна симулација модела

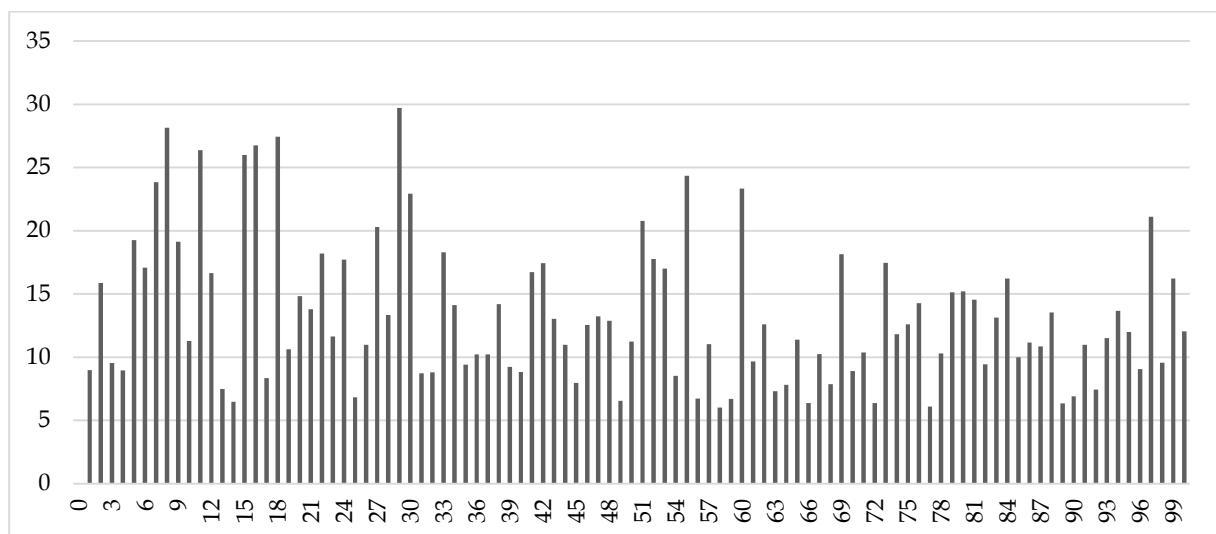
За базну симулацију модела узете су вредности протока пацијената засноване на већ постојећим симулационим моделима процесирања ургентних случајева (Yeh and Lin, 2007), као и просечне вредности пријема COVID-19 пацијената у различитим државама (Bastos, et al., 2021; Birkmeyer, et al., 2020). Вредности везане за хоспитализације COVID-19 пацијената на територији Републике Србије, такође су коришћене у базној симулацији (Kovačević, et al., 2022; Poskurica, et al., 2022). За методу интеграције одабрана је Рунге-Кута метода, где су за јединицу времена узети дани. Модел симулира временски период од

100 дана. За пријем нових пацијената коришћена је Поасонова расподела: poisson (70, 200, 100, 0, 1). На Слици 5.7 приказан је сегмент модела који симулира проток пацијента у болници, након пуштања симулације. Такође, овај део модела представља главни сегмент у идентификацији ефекта различитих стратегија.

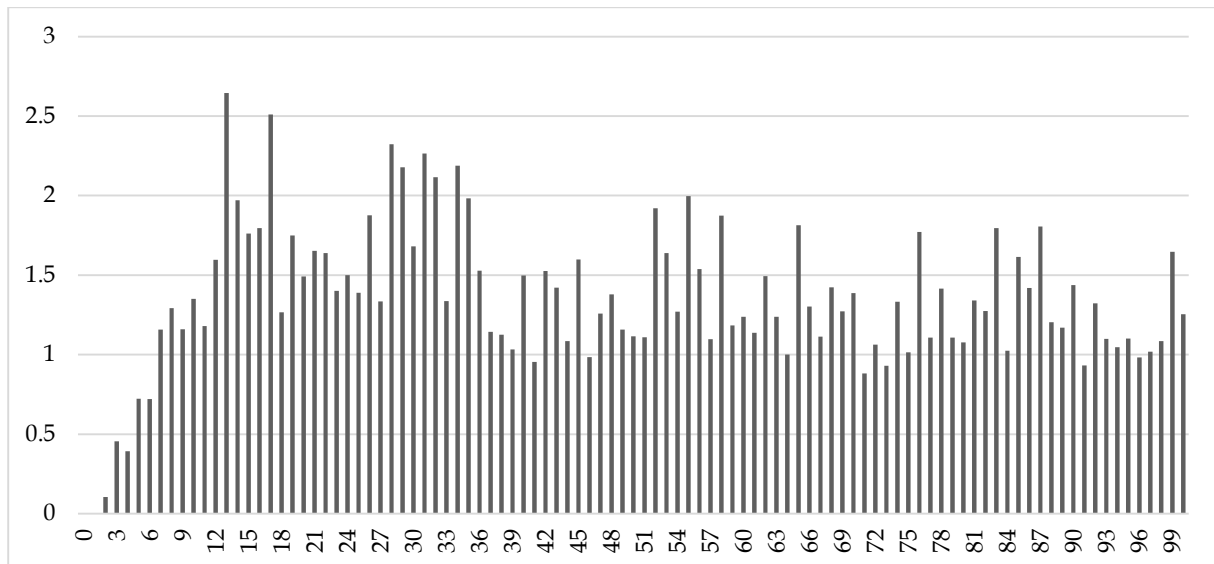


Слика 5.7 Сегмент модела који симулира проток пацијената након пуштања симулације(Vensim софтвер)

Након визуелне инспекције протока пацијената кроз болнички систем, може се увидети да модел нема значајне варијације, као и да су резултати базне симулације у складу са очекиваним вредностима које се појављују у претходно наведеним COVID-19 симулацијама, као и у радовима везаним за хоспитализације у периоду COVID-19 пандемије. У базној симулацији болница има стабилан доток средстава личне заштите, и капацитети болнице су адекватни за пријем нових пацијената. У базној симулацији није дошло до стварања загушења у пријему пацијената из разлога што нема повећања времена лечења пацијената. Слика 5.8 приказује број пацијената на дневном нивоу који прелазе из нивоа Пацијенти у критичном стању у ниво Пацијенти са блажим симптомима.

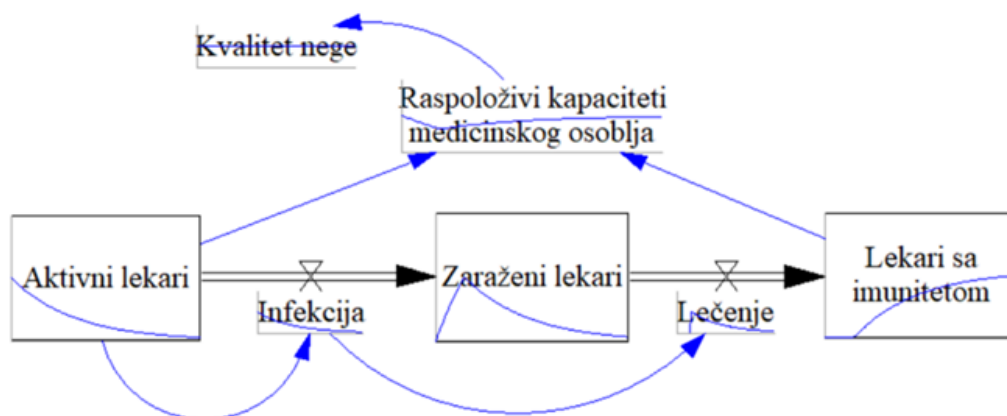


Слика 5.8 Побољшање симптома код пацијената у критичном стању

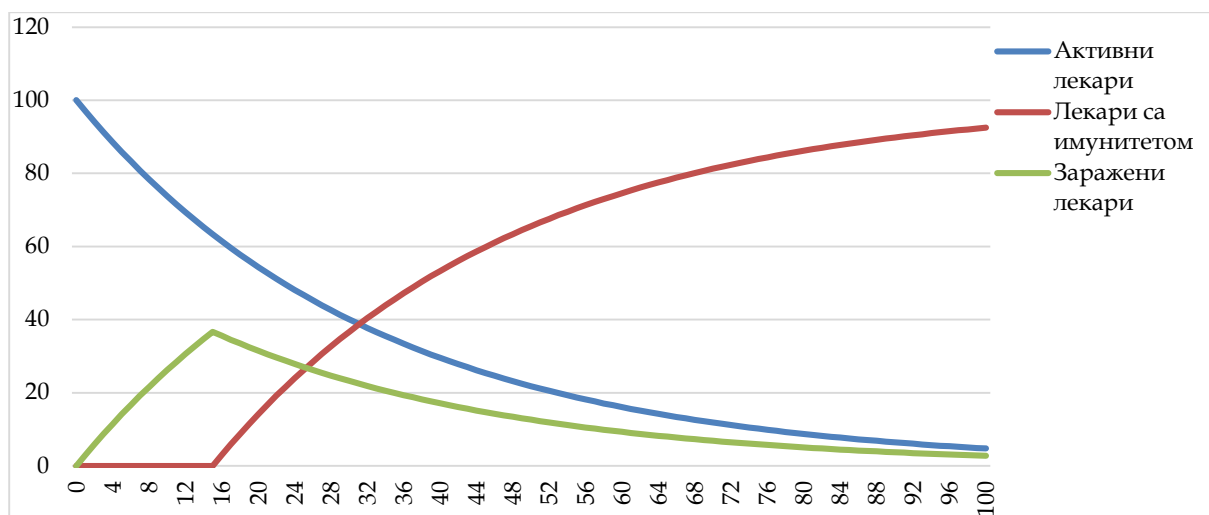


Слика 5.9 Преминули пацијенти на дневном нивоу у базној симулацији

Слика 5.9 приказује вредности дотока преминулих пацијената на дневном нивоу. Индикатор ефикасног лечења пацијената је смањење времена који пацијенти проведу у критичном стању, што директно утиче на смањење преминулих пацијената на дневном нивоу. Битан параметар који регулише вредности на Сликама 5.8 и 5.9 је расположиви капацитет медицинског особља приказан на Слици 5.10. Кроз визуелну инспекцију овог сегмента модела може се увидети да број лекара који су заражени постепено расте, без наглог пада активних лекара и експоненцијалног пада капацитета медицинског особља. Процес лечења заражених лекара формулисан одливом Лечење, користи DELAY Fixed функцију. Ова функција одређује фиксни период од 15 дана за сваког зараженог лекара, што је представљало обавезни карантин за инфицирано медицинско особље у почетном периоду пандемије. Ова вредност је у складу са публикованим радовима (Bastos, et al., 2021; Kovačević, et al., 2022; Poskurica, et al., 2022).



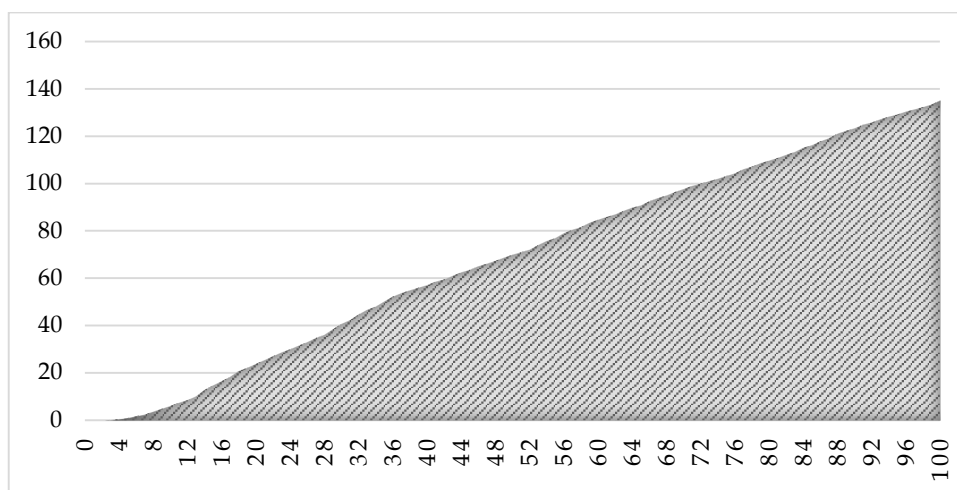
Слика 5.10 Расположиви капацитети медицинског особља у базној симулацији (Vensim софтвер)



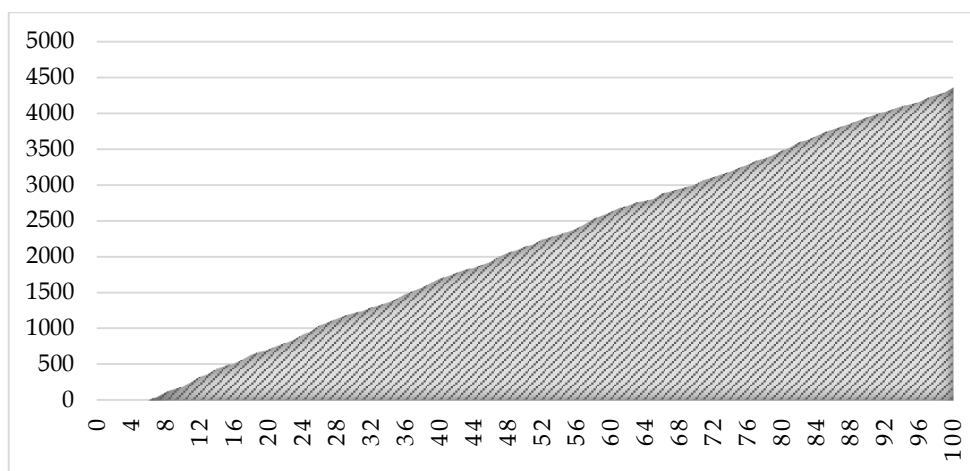
Слика 5.11 Дијаграм процентуалног односа заражених и активних лекара

Слика 5.11 приказује дијаграм односа активних лекара, заражених лекара и лекара са имунитетом. За ефикасно функционисање болнице, битно је избегавати нагли пад активног медицинског особља.

У базној симулацији, укупан број преминулих пацијената у периоду од 100 дана износи 135, као што је приказано на Слици 5.12. Док укупан број излечених пацијената за цео период симулације износи 4,359. У анализи фрагилности система, поред укупног броја преминулих пацијената, битно је упоредити и укупни број излечених пацијената за целокупни период симулације.



Слика 5.12 Укупан број преминулих пацијената у базној симулацији



Слика 5.13 Укупан број излечених пацијената у базној симулацији

5.4.2 Анализа фрагилности болничког система

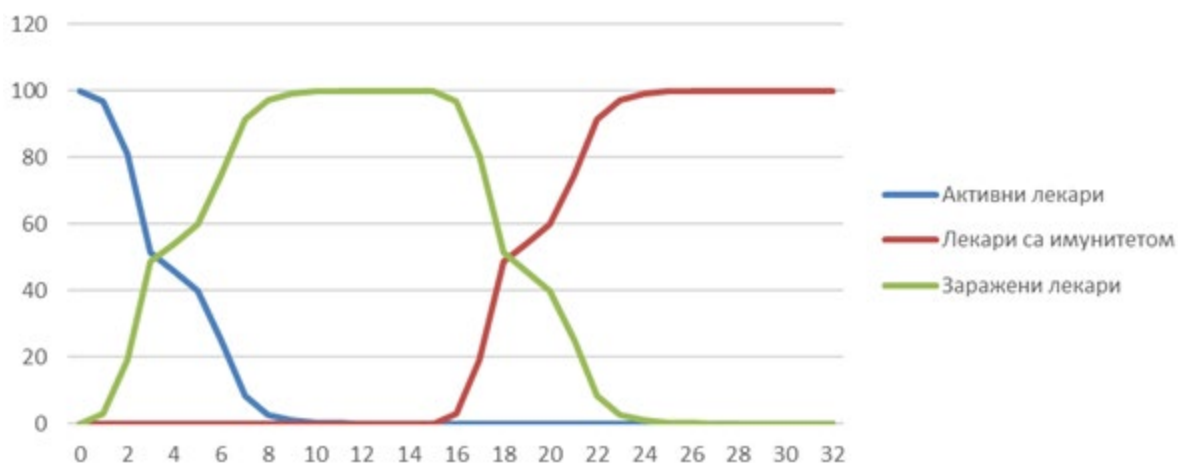
Код анализе фрагилности болничког система постоји низ начина на који систем може бити стављен у “стање стреса”. Како би анализа фрагилности имала значаја у даљем планирању, битно је ставити фокус на варијабле које у реалном систему често негативно утичу на операције система. Фактори који су представљали проблем оптималном функционисању болничких системима, у првобитном периоду COVID-19 пандемије су расположивост средстава личне заштите, и пробијање капацитета болница по питању расположивих кревета, као и осталих критичних ресурса. Фактори попут времена набавке средстава личне заштите, као и брзине доласка нових пацијената, представљају екстерне факторе болничког система. Сама болница по питању стратегије митигације наведених ризика може формирати резервне ресурсе. Међутим, као што је претходно наведено болнички системи у периоду пре COVID-19 пандемије, остварили су висок степен оптимизације расположивог медицинског особља, као и ресурса, све ка циљу смањења трошкова медицинских услуга.

За мерење фрагилности модела, дизајниран је упрошћени програм и унутрашња структура модела у Vensim симулационом окружењу. Циљ ове надоградње модела је да тестира екстерне параметре модела, и укаже на најутицајније параметре или *highest leverage points*. Експерименти ове врсте могу бити спровођени и кроз формирање структуре модела за мерење фрагилности, и након тога коришћењем оптимизационих ресурса Vensim софтвера.

Приликом анализе фрагилности система долази се до закључка да је модел високо осетљив на расподелу долазећих пацијената. У сценарију где је 420 пацијената примљено у болницу на даље лечење, или у просеку стопа пријема пацијената је 60 пацијената/дан, модел не генерише губитке. Међутим, значајне промене у понашању модела се могу увидети у случају да је 200 пацијената примљено у једном дану, а остатак равномерно распоређен по осталим данима. Дискретни скокови броја пацијената који су примљени у једном дану, креира нелинеарно повећање у процесирању пацијената, као и повећање у варијабли Грешке медицинског особља. За тестирање фрагилности модела одабран је и

параметар времена набавке средстава личне заштите. Са повећањем времена набавке, модел генерише нелинеарне губитке у форми инфицираних лекара. У циљу анализе фрагилности, време набавке нових ресурса личне заштите, повећано је са три на четири дана. Повећање времена набавке средстава личне заштите активно је првих 10 дана симулације, након тога време набавке се враћа на иницијалну вредност од три дана. Такође, модел је повећао варијације у пријему пацијената на дневном нивоу, док је укупан број примљених пацијената на недељном нивоу остао исти. Резултати дефинисаних промена се могу видети на Слици 5.14. На основу извршене симулације може се видети да промена у времену набавке средстава личне заштите која траје првих 10 дана, као и промена у пријему пацијената, изазива нагли пад расположивог лекарског особља за прву недељу симулације, тј. број заражених лекара је експоненцијално порастао.

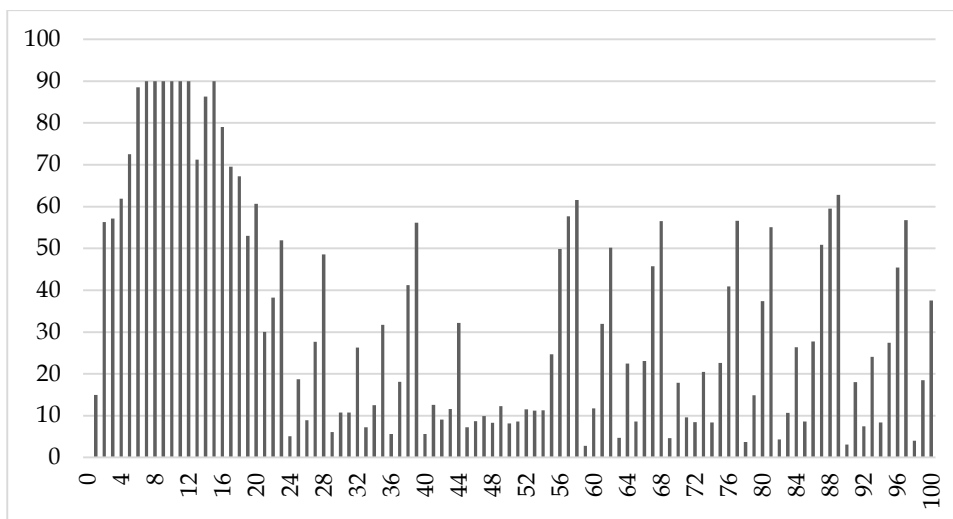
Модел је дизајниран тако да у случају да већина расположивог лекарског особља буде инфицирана, модел користи резервне лекаре, тј. лекаре који би преузели дужности из друге болнице на краћи временски период. Дијаграм расположивог лекарског особља показује процентуално број расположивог и зараженог лекарског особља. Период од 8 до 17 дана, болница није престала са радом, већ је користила резервно лекарско особље које постепено мења заражене лекаре на краћи период.



Слика 5.14 Дијаграм расположивог лекарског особља

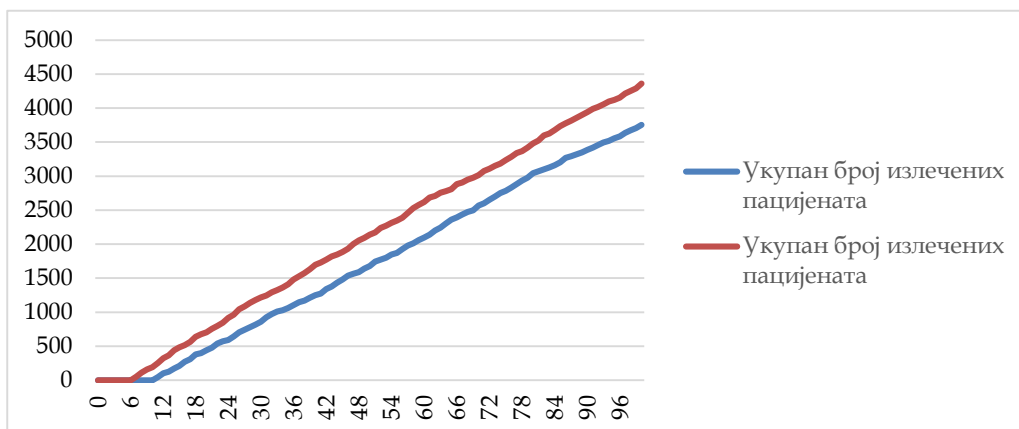
Пројекције са дијаграма на Слици 5.14 су у складу са COVID-19 истраживањима (Kutralam-Muniasamy, et al., 2022; Sigala, et al., 2022) везаним за болнице које указују на могућност брзог ширења заразе између лекара и важности средстава личне заштите. Иако модел није симулирао интеракције између лекара у простору, битно је истаћи да постоји одређени број медицинског особља који циркулише широм болнице, као и да са повећањем броја заражених лекара, интеракције између лекарског особља постају комплексније и учесталије (Gordon, et al., 2021). Период великог броја инфекција медицинског особља подиже и фактор стреса (Слика 5.15). Овај параметар прорачунава однос расположивог лекарског особља са бројем пацијената који чекају на лечење, као и према броју пацијената који су у тренутној фази лечења.

Као што се може видети са дијаграма фактора стреса медицинског особља (Слика 5.15), највеће преоптерећење лекарског особља је у првих 20 дана симулације. Након тог времена већина лекарског особља постаје поново активно и функционише са имунитетом на COVID-19. Дијаграм на Слици 5.15 показује периодичне скокове у фактору стреса код медицинског особља, и у периоду након што је лекарско особље добило имунитет, што значи да не долази до пада у расположивом медицинском особљу. Модел симулира реакцију медицинског особља на варијације у пристизању пацијената на дневном нивоу. Са повећањем стреса медицинског особља опада квалитет неге који лекарско особље указује, и може се очекивати пораст медицинских грешака.



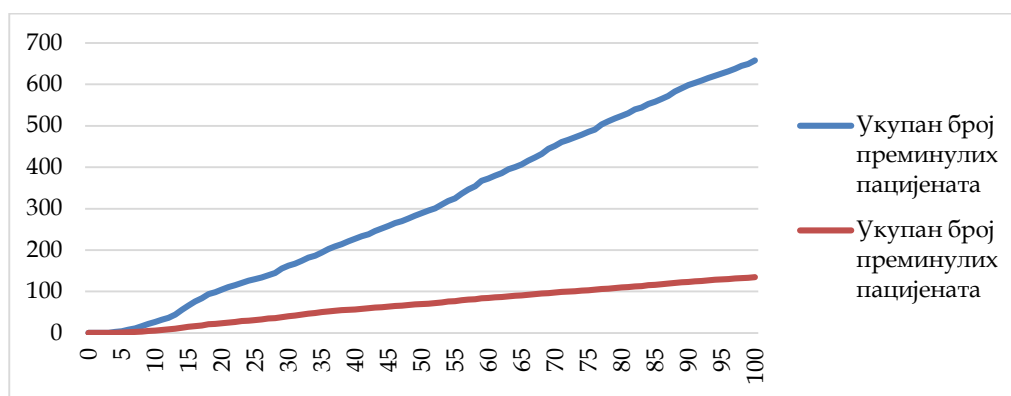
Слика 5. 15 Фактор стреса на медицинско особље

Слика 5.16 приказује разлику у броју излечених пацијената за анализирани период од 100 дана. Базна симулација прорачунава 4,359 излечених пацијената, док је у анализи фрагилности система, болница успела да излечи 3,753. Разлика између две симулације указује на повећање времена лечења пацијената, као и на повећање морталитета као ефекта промене у варијаблима Квалитет лечења и Грешке медицинског особља.



Слика 5.16: Укупан број излечених пацијената базног сценарија (црвено) и сценарија анализе (плаво)

Преоптерећење медицинског особља представља битан ризик, јер приликом наглог повећања пријема пацијената, болнице које немају резервне капацитете у медицинском особљу, могу очекивати нагле скокове у медицинским грешкама. У случају да дође до дуплирања пријема пацијената у систему који је достигао свој максимум, број медицинских грешака се потенцијално неће дуплирати, већ се може очекивати пораст медицинских грешака и до пет пута (Clancy, 2015). Слика 5.17 указује на значајан пораст преминулих пацијената за симулирани период, у односу на базну симулацију. У базној симулацији број преминулих пацијената на крају симулације износио је 135, док код анализе фрагилности број преминулих пацијената износи 657. Генерисана вредност преминулих пацијената код анализе фрагилности указује на стопу морталитета код хоспитализованих пацијената од 14.89%.



Слика 5.17 Број преминулих пацијената у базном сценарију (црвено) и анализи фрагилности (плаво)

Ако се упореди стопа морталитета коју генерише симулација, са подацима о стопи морталитета код хоспитализованих пацијената, за првих 6 месеци пандемије, може се увидети да генерисани резултати дају реалан приказ потенцијалног ризика у болничком систему. Анализа пријема пацијената за период првих 6 месеци пандемије, у 955 различитих болница на територији Сједињених Америчких Држава, указује на стопу морталитета од 9.06% до 15.65% (Asch, et al., 2021). Ако се пореде вредности симулације са претходним публикованим подацима, може се увидети да спроведена симулација генерише валидне резултате.

Спроведена анализа фрагилности указује на факторе који под малим променама, могу генерисати значајне губитке у болничком систему. Ако се упореди висока стопа морталитета хоспитализованих COVID-19 пацијената у симулацији, као и у публикованим радовима (Asch, et al., 2021; Poskurica, et al., 2022) који анализирају почетак пандемије, може се доћи до закључка да су болнички системи на почетку пандемије били неспремни, и самим тим фрагилни на нежељене промене које пандемија доноси.

6. СИМУЛАЦИЈА РИЗИКА МАКРО ПОСЛОВНОГ СИСТЕМА

Моделирање сектора комуналног отпада, као пример анализе фрагилности на макро – нивоу, одабран је због постојања проблема, као што су: велика динамичка комплексност система и релативно ниска ефикасност који указују на потенцијално висок степен фрагилности система на промене. Модел је развијен у сарадњи са Агенцијом за заштиту животне средине Републике Србије, кроз прикупљање и процесирање података о комуналном отпаду за период од 2016. до 2020. године (Јовић, Вошковић, 2021). Дакле, сектор комуналног отпада Републике Србије је одабран да буде моделиран због његове динамичке комплексности, као и релативно ниске ефикасности да би се постигли циљеви дефинисани од стране ЕУ.

Перформансе оваквог система се могу унапредити усклађивањем доношења одлука стејкхолдера са симулационим моделима који адекватно репрезентују понашање целокупног система. Током процеса прикупљања података, уочено је да различити економски ентитети, као и доносиоци одлука у оквиру овог система, нису у потпуности обавештени како целокупни систем функционише са аспекта протока: комуналног отпада, информација и капитала. Лоше разумевање појединачних економских сегмената како целокупни систем функционише је очекивана појава. Разлог за то је процес специјализације појединачних ентитета попут; државних и приватних предузећа као и регулаторних тела, на решавање појединачних проблема унутар система. Само у случају када је сектор комуналног отпада сагледаван као целокупни систем, могуће је идентификовати кључна ограничења у протоку отпада, информација, као и одређивању приоритетног ризика за систем. Теорија ограничења која је током година прошла низ структурних промена (Watson, Blackstone, Gardiner, 2006), остала је непромењена у веровању да је једини адекватан начин за анализу комплексног система сагледавање целокупног система, насупротив анализи појединачних сегмената и након тога дефинисања закључка о целокупном систему. Као што је већ раније наглашено, постоји корелација између најугрожености уског грла система и извора фрагилности за целокупни систем. Избегавање унапређења сваког сегмента система, и доношење одлуке да процес унапређења треба бити фокусиран на најугроженост ограничење система, може генерисати значајна побољшања у перформансама компанија, као и већих мрежа и дистрибутивних ланаца (Mabin, Balderstone, 2020). Стратегија избегавања унапређења сваког појединачног сегмента у систему и боље фокусирање ресурса, од изузетног је значаја код система попут сектора комуналног отпада. Целокупни систем комуналног отпада Републике Србије представља велики економски сектор, и унапређење више сегмената може представљати велики изазов по питању капиталних инвестиција, као и захтеваног времена за реализацију. Динамика система која је креирана за симулирање комплексних система свих величина (Forrester, 2007) има одличне могућности у интеграцији са менаџерским приступима, попут теорије ограничења или LEAN приступа. Комбиновање динамике система и теорије

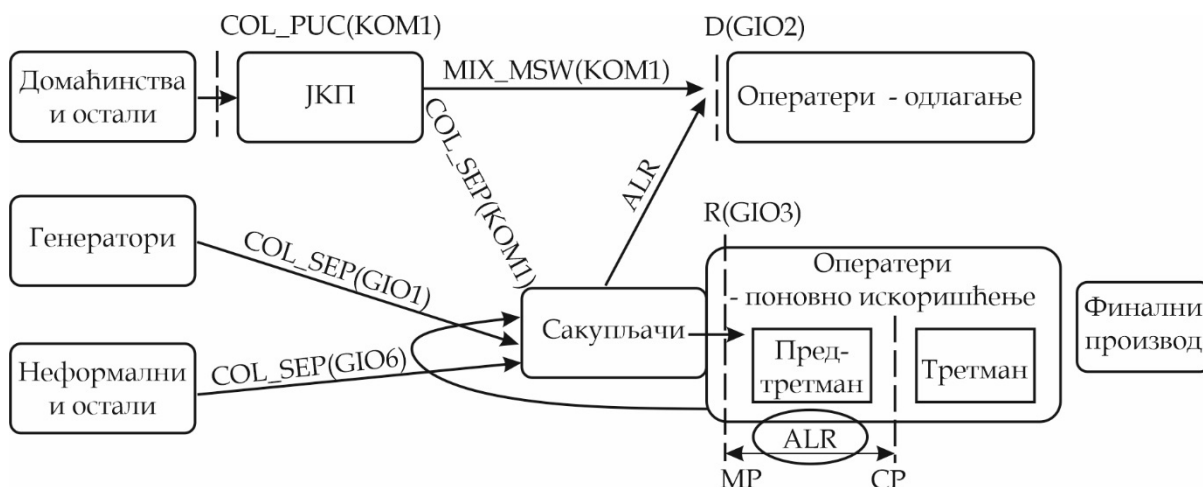
ограничења се показало као одлично мулти-методолошко решење за анализу комплексних система (Davies, Mabin, Cox, 2004). Комплексни системи попут сектора комуналног отпада (СКО), приликом процеса моделирања у динамици система, захтевају прецизно дефинисање граница модела. Одређивање граница модела код вишег нивоа апстракције, као у случају СКО, од кључног је значаја (Sterman, 2002). Такође једноставна графичка структура модела креираних у динамици система, омогућава инспекцију и учешће у формирању структуре модела од стране различитих стејкхолдера (Novmand, 2014).

Као што је већ наглашено, развијени модел има за циљ да попуни недостатак у публикованим истраживањима на тему унапређења перформанси сектора комуналног отпада. Евидентиран је и недостатак модела који сагледавају операције целокупног система, а самим тим је ограничена и имплементација напредних анализа ризика, као и стратегија за повећање перформанси. Ако сектор комуналног отпада није сагледан као целина, постоји велика вероватноћа да ће фокус капиталних инвестиција и развојних стратегија бити усмерен на погрешан сегмент система. Циљ модела је прецизно дефинисање оперативних и логистичких обавеза сваког економског субјекта у систему, као и свих генератора комуналног отпада. Највећи удео у генерисању комуналног отпада имају домаћинства, док остатак генерисаног отпада произилази из приватних компанија и државног сектора. Комунални отпад је дефинисан у члану 3(2) Директиве о управљању отпадом 2008/98/ЕЦ (Waste Framework Directive 2008/98/EC) креиране од стране Европског парламента (Directive 2008/98/EC). Наведена директива дефинише комунални отпад као “мешани отпад и одвојено прикупљени отпад генерисан од стране домаћинства, као и отпад из других извора, где је састав отпада сличан генерисаном отпаду од стране домаћинства”. Отпад који је сличан по саставу отпаду генерисаном од стране домаћинства, може бити прикупљен од стране јавних комуналних предузећа, као и приватних ентитета. Наведени отпад се класификује као комунални отпад, осим у случају да је порекло отпада производни сектор.

6.1. Модел за прорачун главних индикатора комуналног отпада

У првобитним фазама концептуализације симулационог модела, креиран је макро дијаграм комуналног сектора Републике Србије. Макро дијаграм, приказан на Слици 6.1, дефинише главне генераторе комуналног отпада на територији Републике Србије, и целокупни животни циклус комуналног отпада након његовог генерисања. Дијаграм приказује различите агенте у сектору комуналног отпада. Као што је већ напоменуто, генератори комуналног отпада су: домаћинства, привредни субјекти и државне институције. Систем такође садржи ентитете који се баве прикупљањем, одлагањем и третманом отпада. Термини GIO1, GIO2, GIO3, GIO6 и КОМ1 представљају вредности протока различитих фракција отпада на годишњем нивоу. Све вредности произилазе из годишњих извештаја, које генерише Агенција за заштиту животне средине (Official Gazette of Republic of RS, 2021). Дијаграм приказује проток комуналног

отпада од ентитета на левој страни (домаћинства, генератори, неформални сектор), ка ентитетима на десној страни које чине оператори за одлагање отпада и оператори за поновно искоришћење отпада (рециклери).



Слика 6.1 Макро дијаграм токова комуналног отпада на територији Републике Србије

Оператори за одлагање отпада су депоније, а подаци о количинама одложеног отпада се налазе у Годишњим извештајима о отпаду оператора на депонијама отпада (образац ГИО 2). Оператори за поновно искоришћење отпада (рециклери) чине постројења за пред-третман и третман одвојено сакупљеног отпада. Извор података су Годишњи извештаји о отпаду оператора постројења за поновно искоришћење отпада (образац ГИО 3). Главни ентитет који спаја генераторе отпада са операторима је скуп комуналних предузећа (ЈКП) која су у већином у државном власништву, а делом у приватном сектору. Подаци о количинама прикупљеног отпада од стране комуналних предузећа налазе се Годишњим извештајима о комуналном отпаду (образац КОМ 1). Битно је нагласити да прикупљање комуналног отпада, поред комуналних предузећа могу радити и приватни субјекти (сакупљачи отпада). Сакупљачи отпада могу бити подељени у две групе: неформални и регистровани. Неформални сакупљачи су нерегистровани и непрепознати у својим активностима од стране државних органа. Ови ентитети скупљају отпад и испоручују прикупљени отпад регистрованим ентитетима. Подаци се евидентирају кроз Годишње извештаје о отпаду сакупљача и других власника отпада (образац ГИО 6). Агенти који чине неформални сектор, кроз своје активности су одговорни за велики проценат прикупљеног и раздвојеног отпада на годишњем нивоу.

Као што је приказано на Слици 6.1, правни субјекти који генерирају комунални отпад (генератори отпада) прослеђују отпад ка сакупљачима. Подаци о количинама овог отпада се налазе у Годишњим извештајима о отпаду произвођача отпада (образац ГИО 1).

Као што је раније наглашено, подаци о комуналном отпаду генерирани кроз наведене годишње извештаје се смештају и процесирају у бази података Националног регистра извора загађивања (НРИЗ), у оквиру информационог система Агенције за заштиту животне средине Републике Србије.

6.2. Индикатори комуналног отпада

Један од прописаних захтева Канцеларије за статистику Европске уније – Еуростат, према државама чланицама, као и кандидатима за чланство у ЕУ, је подношење годишњег извештаја о стању сектора комуналног отпада (ЕС, and the Joint Questionnaire of Eurostat and OECD, 2021).

Подношење годишњег извештаја о стању сектора комуналног отпада, базирано је на прецизно дефинисаним индикаторима.

Кључни индикатори комуналног отпада су:

1. Укупна количина генерисаног комуналног отпада,
2. Количина раздвојено сакупљеног комуналног отпада,
3. Количина третираног комуналног отпада,
4. Количина рециклираног комуналног отпада,
5. Стопа рециклаже комуналног отпада.

У тексту који следи приказаће се методологије за прорачун кључних индикатора комуналног отпада, потпуно у складу са захтевима Еуростата на којима Агенција за заштиту животне средине базира своју базу података, као и годишње извештаје.

6.2.1 Укупна количина генерисаног комуналног отпада

Индикатор укупне количине генерисаног отпада (GEN) се рачуна коришћењем следећег израза (Јовичић, et al., 2022):

$$GEN = COL_PUC(KOM1) + COL_SEP(GIO1) + COL_SEP(GIO6) \quad (6.1)$$

где је:

COL_PUC(KOM1) – комунални отпад прикупљен од стране комуналних предузећа у оквиру локалних заједница (општина);

COL_SEP(GIO1) – комунални отпад генерисан од стране приватних ентитета, и достављен сакупљачима отпада без посредства комуналних предузећа;

COL_SEP(GIO6) – количина раздвојено сакупљеног отпада од стране неформалног сектора (физичких лица) и која је достављена сакупљачима.

Комунални отпад прикупљен од стране комуналних предузећа, може се дефинисати као сума сакупљеног мешаног отпада који иде на одлагање (MIX_MSW(KOM1)) и раздвојено прикупљеног отпада који се усмерава на процес поновног искоришћења (рециклажа и енергија из отпада) COL_SEP(KOM1):

$$COL_PUC(KOM1) = MIX_MSW(KOM1) + COL_SEP(KOM1) \quad (6.2)$$

Укупна количина прикупљеног отпада од стране комуналних предузећа COL_PUC(KOM1), срачуната је сумирањем вредности генерисаног комуналног отпада у свакој локалној заједници (општини) на територији Републике Србије, које су приказане у КОМ 1 годишњим извештајима.

6.2.2 Третирани комунални отпад

Третирани комунални отпад TRT (treated) подразумева отпад прослеђен на поновно искоришћење RCV (recovered) и одложен отпад DSP (disposed):

$$TRT = RCV + DSP \quad (6.3)$$

Ако се прате ознаке на макро дијаграму (Слика 6.1), укупна количина комуналног отпада прослеђеног на поновно искоришћење (поступци третмана отпада R1-R11), може да се дефинише на следећи начин:

$$RCV = COL_SEP - ALR, \quad (6.4)$$

услед чињенице да укупна количина поновно искоришћеног отпада (RCV) мора бити једнака маси отпада у прорачунској тачки CP (calculation point). Треба уочити са Сlike 6.1, да је укупна количина раздвојено прикупљеног отпада на локацији тачке мерења отпада MP (measuring point), умањена за губитке ALR (average loss rate) настале током процеса пред-третмана отпада. Детаљи који се односе на дефинисање и прорачун просечне стопе губитака ALR, по различитим фракцијама отпада, могу се наћи у документу CID (EU) 2019/1004, (Commission Implementing Decision, 2019).

До успостављања националног регистра Србије за просечне стопе губитака отпада (ALR), којим би се дефинисала стандардизована методологија за прорачун, усвојена је фиксна вредност од 1% од укупног раздвојено прикупљеног отпада за све фракције.

У складу са ознакама са макро дијаграма представљеног на Слици 6.1, укупна количина одложеног комуналног отпада (DSP) може да се представи преко следећег израза:

$$DSP = D(GIO2) \quad (6.5)$$

где ознака D(GIO2) представља количину измереног комуналног отпада на улазу у постројење за одлагање отпада или депонију (подаци преузети из годишњих извештаја ГИО 2).

6.2.3 Количина рециклираног комуналног отпада

Укупна количина рециклираног комуналног отпада RCV (recycled) је подскуп укупног отпада прослеђеног на поновно искоришћење (RCV). То је сума рециклираних металних и неорганских материјала (поступци третмана отпада R4 и R5) и рециклираних органских материјала (поступак третмана отпада R3). Отуда, укупна количина рециклираног комуналног отпада RCV може да се израчуна као:

$$RCY = RCV (R3, R4, R5) \quad (6.6)$$

где је RCV (R3, R4, R5) означава количину раздвојено прикупљеног отпада третираног поступцима R3, R4 и R5.

Коришћењем методе 4 за калкулацију циљева протока комуналног отпада Одлука 2011/753/EU (Commission Decision 2011/753/EU, 2011), стопа рециклаже комуналног отпада RCY_R (recycle rate) се прорачунава у складу са методологијом дефинисаном документом CID 2011/753/EU (Commission Decision 2011/753/EU, 2011). Отуда:

$$RCY_R = \frac{\text{Рециклирани комунални отпад}}{\text{Генерисани комунални отпад}} \times 100 \quad (6.7)$$

Користећи претходно дефинисане изразе, стопа рециклаже комуналног отпада може да се представи као:

$$RCY_R = \frac{RCV(R3,R4,R5)}{GEN} \times 100 \quad (6.8)$$

6.2.4 Вредности индикатора комуналног отпада

Прорачун главних индикатора комуналног отпада развијен је на основу претходно приказане методологије и прикупљених и обрађених података о комуналном отпаду из базе података Агенције за заштиту животне средине Републике Србије за период од 2016. до 2020. године (Јовичић, Вошковић, 2021).

Количина генерисаног комуналног отпада сегментирана по различитим фракцијама, базирана је на прорачунатим вредностима раздвојено прикупљеног отпада, као и подацима о прикупљеном мешаном отпаду (SEPA, 2020).

Расподела фракција комуналног отпада за 2020. годину приказана је у Табели 6.1, а заснована је на формату дефинисаном у документом CID 2019/1004/EC Annex V (Commission Decision 2011/753/EU, 2011).

Табела 6.1 Расподела фракција комуналног отпада за 2020. годину.

Фракција отпада	Удео (%)	Mix_MSW (t)	COL_SEP (t)	GEN (t)
Метали	4.3	105,994	47,853	153,848
Стакло	4	98,599	22,238	120,838
Пластика	12.2	300,728	55,293	356,021
Папир и картон	6.2	152,829	229,973	382,802
Био-отпад	47.4	1,168,401	11,469	1,179,870
Дрво	2.9	71,484	27,945	99,429
Текстил	3.3	81,344	61	81,405
WEEE	4.3	105,994	60,704	166,698
Батерије	0.002	49	21	70
Кабаста отпад	0.038	937	422	1359
Мешани отпад	14.4	354,957	0	354,957
Остало	0.96	23,664	26,536	50,199

Укупно	100	2,464,981	482,515	2,947,496
---------------	------------	------------------	----------------	------------------

Такође, сви релевантни параметри комуналног отпада за период од 2016. до 2020. године, прорачунати су и приказани у Табели 6.2. На основу вредности из Табеле 6.2, формиране су вредности главних индикатора комуналног отпада (Табела 6.3).

Табела 2. Параметри комуналног отпада за период 2016-2020.

Варијабла	2016	2017	2018	2019	2020
MSW_MIX(KOM1)	1,984,500	2,275,000	2,340,909	2,361,748	2,464,981
COL_SEP(KOM1)	13,024	17,092	5989	5808	16,731
COL_SEP(GIO1)	133,813	140,708	160,459	168,569	160,785
COL_SEP(GIO6)	224,834	265,057	287,940	291,784	305,000

Табела 6.3 Индикатори комуналног отпада за период 2016-2020.

Индикатор	Формула за прорачун	2016	2017	2018	2019	2020
Генерисани комунални отпад (t)	$GEN = COL_PUC(KOM1) + COL_SEP(GIO1) + COL_SEP(GIO6)$	2,356,171	2,697,857	2,795,296	2,827,910	2,947,497
Раздвојено прикупљен отпад (t)	$COL_SEP = COL_SEP(KOM1) + COL_SEP(GIO1) + COL_SEP(GIO6)$	371,671	422,857	454,387	466,162	482,515
Рециклирани отпад (t)	$RCY = RCV (R3, R4, R5)$	341,345	394,863	421,826	435,233	455,457
Издавање енергије из отпада (t)	$RCV_E = RCV (R1)$	2911	3224	3861	6689	5860
Остали третмани (t)	$RCV_OTH = RCV$	23,546	20,465	24,425	19,818	16,580
Стопа рециклаже (%)	$RCY_R = RCV (R3, R4, R5)/GEN$	14.49	14.64	15.09	15.39	15.45

Као што је приказано у Табели 6.3, стопа рециклаже (RCY_R) је прорачуната кроз количине раздвојено прикупљеног отпада који потиче са извора отпада, како је приказано на левој страни дијаграма на Слици 6.1 (комунална предузећа, генератори и неформални сектор). Разлика у карактеристичним величинама параметара отпада рачунатих са стране извора отпада и третмана (дестинације) отпада релативно је мала, поготову у односу на укупну количину генерисаног отпада. Имајући у виду да је циљ развијеног

симулационог модела да омогући анализу могућих сценарија за значајно повећање стопе рециклаже, овај индикатор ће се прорачунавати и анализирати преко величина са стране извора комуналног отпада.

У складу са директивом (ЕУ) 2018/851 Европског парламента, државе чланице ЕУ су у обавези да постигну минимални ниво рециклаже комуналног отпада према следећем временском оквиру:

1. до 2025. године минимално 55%;
2. до 2030. године минимално 60%;
3. до 2035. године минимално 65%.

Република Србија као држава кандидат за чланство у ЕУ, у процесу је усклађивања са ЕУ захтевима. Имајући на уму вредности из Табеле 6.3, очигледно је да је тренутни ниво рециклаже у Републици Србији значајно испод захтева ЕУ. С тим у вези, јасно је да се морају анализирати и дефинисати могући и одрживи услови за значајно повећања стопе рециклаже у сектору комуналног отпада у годинама које следе.

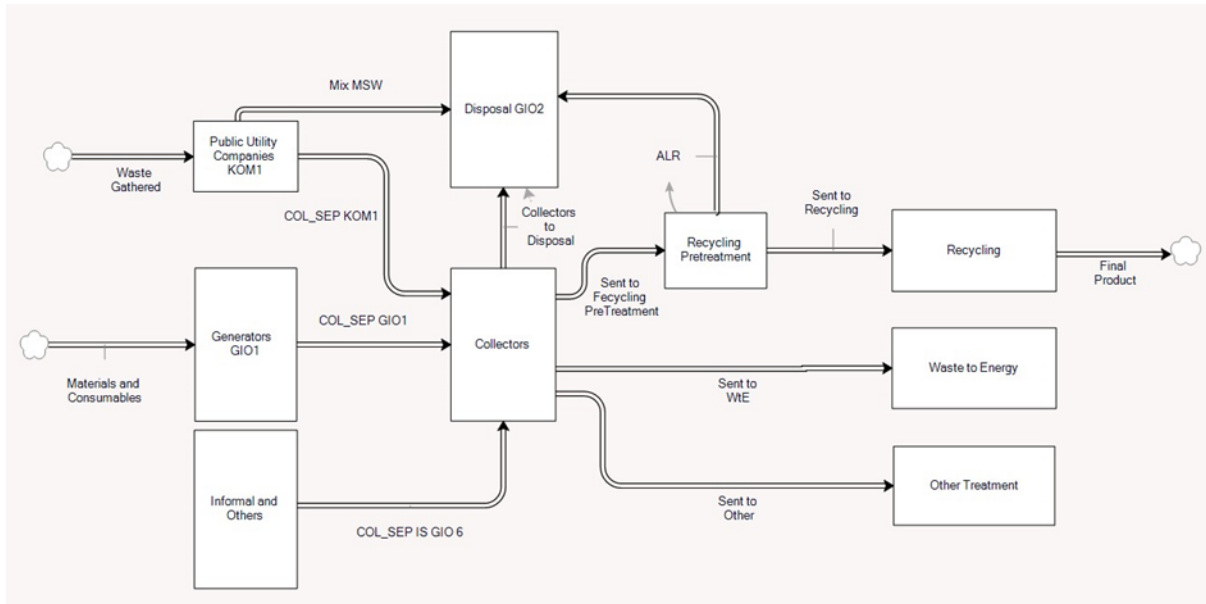
6.3. Модел сектора комуналног отпада креиран у динамици система

Макро дијаграм сектора комуналног отпада са Слике 6.1 приказује статичку структуру протока и складиштења отпада на територији Србије. Дијаграм је из своје статичне форме претворен у нумерички модел креиран из више слојева који приказује динамичку структуру сектора комуналног отпада (Слика 6.3).

Динамички макро модел (Слика 6.3) симулира проток различитих фракција отпада кроз стандардну структуру (нивои, повратне петље, прилив и одлив) која се користи у моделирању динамиком система. Као што је приказано у Табели 6.1, анализирано је 12 различитих фракција комуналног отпада, и све дефинисане фракције протичу кроз модел. Креирани модел обједињује две методологије моделирања: динамичку систему и симулације засноване на агентима. Модел прорачунава проток комуналног отпада као кластер различитих агената, где је и комунални отпад који протиче кроз модел представљен као популација агената са различитим атрибутима. Као што је приказано на Слици 6.3 приливи у нивое, као и одливи, показују смер кретања отпада кроз систем. Функције које дефинишу приливе и одливе, одређују проток отпада у само једном смеру.

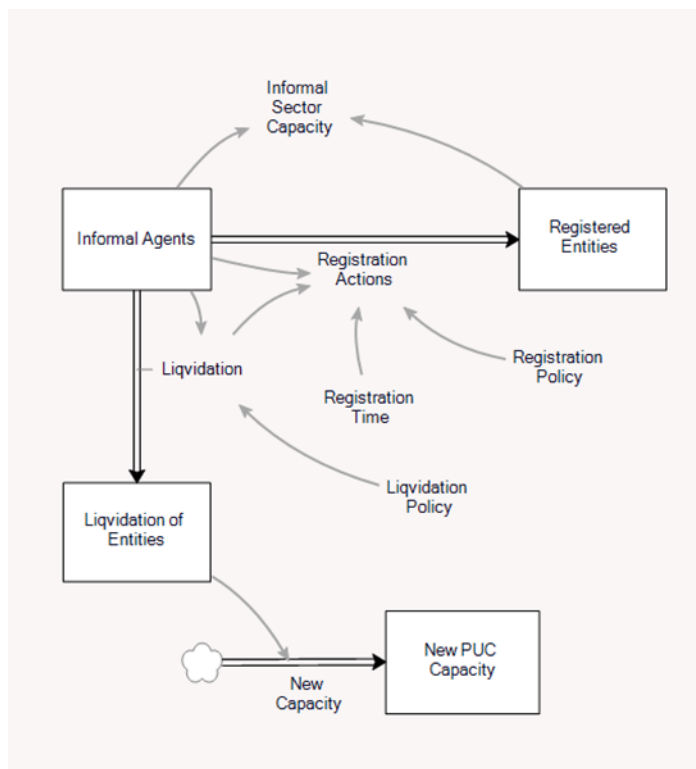
Макро модел креиран у динамици система омогућава лаку визуелну инспекцију структуре модела од стране експерата и стејкхолдера. Креирани модел је прошао низ валидационих фаза, са циљем да структура симулационог модела прецизно репрезентује стварну динамику протока комуналног отпада на територији Србије. На Слици 6.3 је приказан макро модел сектора, док целокупни модел садржи и под-модел (Слика 6.4) који симулира утицај различитих политичких иницијатива на неформални сектор. Моделирање и

симулација перформанси неформалног сектора је од кључне важности за анализирање целокупног система, из разлога што је овај сегмент система комуналног отпада одговоран за 62.3% од укупно раздвојено сакупљеног отпада који је достављен сакупљачима у 2020. години (Табела 6.2).



Слика 6.3 Макро модел комуналног сектора у динамици система (Јовичић, et al., 2022)

Под-модел симулира две стратегије за неформални сектор: ликвидацију свих нерегистрованих ентитета и стратегију легализације и регистравања неформалног сектора. Стратегија легализације неформалног сектора представља значајно дужи процес од ликвидације нелегалних агената који учествују у прикупљању отпада, такође овај процес је и капитално интезиван. Битне варијабле за анализу у овом сегменту модела су капацитет неформалног сектора (*informal sector capacity*) и нови креирани капацитет јавних комуналних предузећа (*new PUC capacity*). Под-модел (Слика 6.4) дефинише понашање макро модела (Слика 6.3), пре свега кроз промене у укупном протоку COL_SEP(GIO6), или кроз промене одређене фракције комуналног отпада. Битно је истаћи да је кроз под-модел могуће тестирати различите стратегије, које имају значајан утицај на перформансе комуналних предузећа и њихове будуће капацитете. У случају ликвидације неформалног сектора од стране државних регулаторних тела, комунална предузећа би била у обавези да надокнаде изгубљени капацитет неформалног сектора у раздвојено сакупљеном комуналном отпаду.



Слика 6.4 Под-модел за анализу неформалног сектора (Јовичић, et al., 2022)

Битно је нагласити да су, у 2020. години (Табела 6.2), сва комунална предузећа на територији Републике Србије, доставила сакупљачима свега 5.5% раздвојено прикушњеног отпада, од укупне количине која је достављена сакупљачима од стране неформалног сектора. У симулационом моделу анализирано је и спровођење алтернативне политике реструктурирања неформалног сектора, где је популација неформалних агената изложена мање агресивним мерама са циљем боље интеграције у неформални сектор. У овој стратегији популација неформалног сектора је кроз плански успорен процес регистрације и обуке интегрисана у легалне токове сектора комуналног отпада. Све са циљем да се избегне нагли пад капацитета које неформални сектор пружа систему. Алтернативна стратегија захтева значајно дуже времена за имплементацију у односу на процес ликвидације, такође ова стратегија потенцијално захтева значајне капиталне инвестиције.

6.4. Резултати симулације

У фази иницијализације модела, дефинисани индикатори комуналног отпада су прорачунати за период од 2016. до 2020. године (Табеле 1-3), и након тога су коришћени као улазни скупови података за креирање различитих симулационих сценарија. Главни задатак симулационог модела је био да сагледа могућности достизања циљева стопе рециклаже постављене директивом (EU) 2018/851 Европског парламента (Directive 2008/98/EC).

6.4.1 Базни сценарио

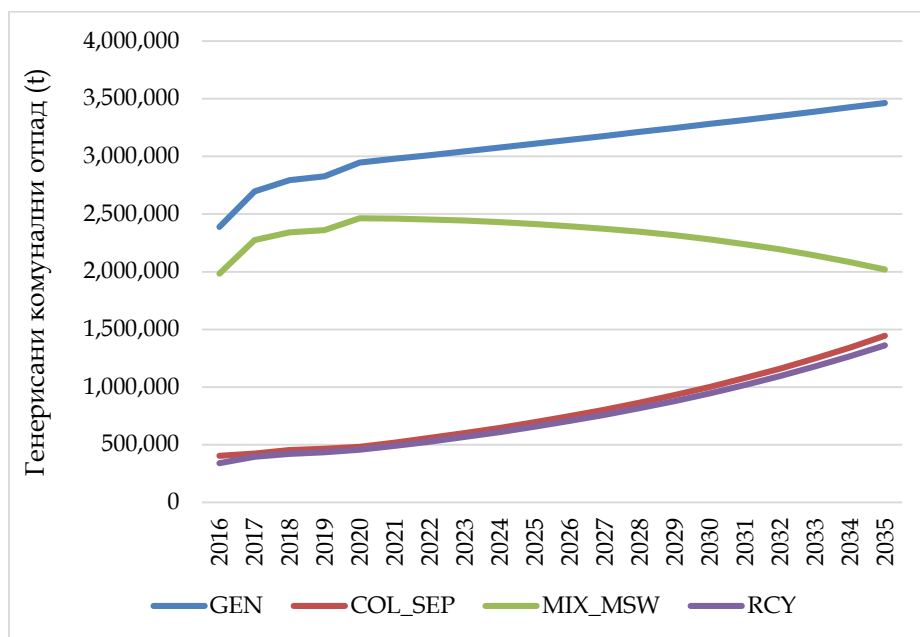
Базни сценарио симулира потенцијални развој сектора комуналног отпада Републике Србије, заснован на трендовима генерисаним из података о отпаду за период од 2016. до 2020. године, као и подацима заснованим на економским трендовима српске економије (Јовичић, et al., 2022). Базни сценарио је коришћен као један од више потенцијалних развојних токова овог сектора, са циљем показивања реалног одступања од зацртаних циљева Европске уније за период до 2035. године. Пораст производње комуналног отпада у Републици Србији, за период од 2021. до 2035. године, постављен да буде на нивоу од 1.08% на годишњем нивоу. Ова стопа раста одговара претпоставци да, пројектовано за 2035. годину годишња количина генерисаног комуналног отпада по глави становника Републике Србије, одговара тренутним вредностима генерисања отпада по глави становника у ЕУ (Eurostat Municipal Waste Statistics, 2019). Образложење за повећање генерисаног комуналног отпада по глави становника Републике Србије, са тренутних 427 kg/st на 502 kg/st, базирано је на пројектованом расту БДП-а Србије од 4 до 7% за период од 10 година (World Bank, 2019). Такође, у базном сценарију је пројектовано да ће ефекат економског раста, имати утицај загушења процеса депопулације, који данас износи -6.7% на годишњем нивоу, што ће довести да ниво популације 2035. године буде сличан нивоу из 2020. године (6,899,126) (Statistical Office of the Republic of Serbia, 2020). Пратећи расподелу количина раздвојено прикупљеног отпада у анализираном периоду од 5 година, усвојена стопа раста за овај индикатор ће бити 7.5% до 2035. године.

Табела 6.4 Индикатори комуналног отпада у базном сценарију

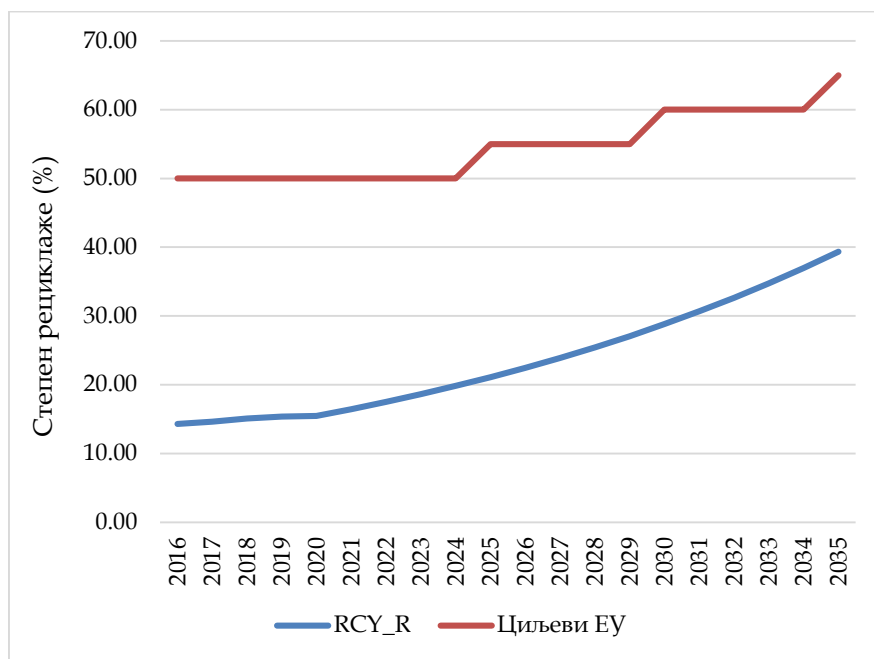
Индикатор	2020	2025	2030	2035
Генерисани комунални отпад (t)	2,947,496	3,110,136	3,281,751	3,462,835
Генерисани комунални отпад по глави становника (kg/st)	427	451	476	502
Раздвојени прикупљени отпад (t)	482,515	695,294	1,001,905	1,443,724
Прикупљени мешани отпад (t)	2,464,981	2,414,842	2,279,846	2,019,111
Рециклирани отпад (t)	455,457	656,304	945,720	1,362,764
Стопа рециклаже (%)	15.45	21.10	28.82	39.35

Преузете стопе раста за укупну количину раздвојено прикупљеног отпада, као и укупну количину генерисаног комуналног отпада, коришћени су као улазни параметри за модел. Базирано на ова два улазна параметра, вредности мешаног прикупљеног отпада, укупне количине рециклираног отпада, као и стопе рециклаже су прорачунате за период од 2021. до 2035. године (Табела 6.4). Слика 6.5.а показује вредности базног сценарија за период од 2016. до 2035. године, где су графички приказани: генерисани комунални отпад (GEN), сакупљени мешани отпад (Mix_MSW), раздвојено прикупљени отпад (COL_SEP), и рециклирани отпад (RCY). Слика 6.5.б приказује прорачунате вредности стопе рециклаже комуналног отпада (RCY_R), упоређене са циљаним стопама

рециклаже постављеним од стране ЕУ (Directive 2008/98/EC) за период од 2016. до 2035. године.



Слика 6.5а Пројекције базног сценарија за кључне индикаторе (Јовић, et al., 2022)



Слика 6.5б Пројекција базног сценарија за остварени степен рециклаже (Јовић, et al., 2022)

Кроз анализирање индикатора комуналног отпада у базном сценарију, јасно се уочава значајно одступање између пројектованих вредности стопе рециклаже комуналног отпада за 2035. годину која износи 39.45%, и прописаног ЕУ циља од 65%. Закључак овог сценарија је да тренутне стопе раста и трендови у сакупљању комуналног отпада на територији Републике Србије, не гарантују

остваривање циљеве Европске уније. Базни сценарио указује да су потребна значајна побољшања у систему раздвојеног сакупљања комуналног отпада, како би се сектор комуналног отпада приближио прописаним стопама рециклаже.

6.4.2 Сценарио за оптимални потенцијал рециклаже

Циљ овог сценарија је да се одреди горњи лимит рециклажног потенцијала сектора комуналног отпада, и то са аспекта прикупљања и техничких потенцијала за рециклажу. Максимални рециклажни потенцијал представља највећу количину отпада у систему, који се може сакупити и искористити за рециклажу. Другим речима, максимални рециклажни потенцијал дефинише највиши ниво рециклабилног отпада унутар система који је могуће прикупити за процес рециклаже, уз узимање у обзир реалних ограничења примарне сепарације отпада публикованих у литератури (Williams, et al., 2020; Van der Linden, 2018).

Технички потенцијал за рециклажу комуналног отпада представља однос између финалних количина рециклираног отпада и количина отпада које су прикупљене за процес рециклаже. Као пример се могу узети стопе губитака различитих фракција отпада у процесу пред-третмана, и техничка ограничења самих постројења за рециклажу. Подаци о евидентираним губицима различитих фракција рециклабилног отпада релевантних за овај сценарио, прикупљени су од стране рециклера отпада из ЕУ, у складу са имплементационом директивом ЕУ (EU)-2019/1004 (Commission Decision 2011/753/EU, 2011). Коришћени приступ за анализу максималног рециклажног потенцијала може се окарактерисати као ботом-ап (bottom-up), и дефинише горње лимите стопа рециклаже у Републици Србији. У контексту овог приступа, потенцијал рециклаже свих фракција отпада је дефинисан у моделу на основу података из постојеће литературе (Williams, et al., 2020).

У првом кораку овог сценарија, количине одвојено сакупљеног отпада за 2035. годину (COL_SEP 2035) су прорачунате на основу пројектованих вредности укупног генерисаног отпада (GEN 2035), као и процената максимално могућег издвајања по свакој фракцији комуналног отпада (Max_SEP) (Williams, et al., 2020). Поред наведених параметара, у Табели 6.5 су приказане прорачунате вредности стопа раста за сваку фракцију комуналног отпада. Ове вредности су даље коришћене као улазни подаци у креирању симулационог сценарија за дефинисање одговарајућих параметара рециклаже комуналног отпада у периоду од 2021. до 2035. године.

Табела 6.5 Максималне стопе примарне сепарације по фракцијама отпада и прорачунате стопе раста за период од 2020. до 2035. године.

Фракција отпада	GEN 2035 (t)	Max_SEP (%)	COL_SEP 2035 (t)	Стопа раста (% годишње)
Метали	180,746	96	173,516	8.97
Стакло	141,965	77	109,313	11.20

Пластика	418,268	70	292,787	11.75
Папир и картон	449,731	96	431,742	4.29
Био-отпад	1,386,157	95	1,316,849	37.20
Дрво	116,814	43	50,230	3.99
Текстил	95,638	74	70,772	60.15
WEEE	195,844	75	146,883	6.07
Батерије	82	100	82	9.68
Кабастни отпад	1597	75	1197	7.20
Мешани отпад	417,018	0	0	0.00
Остало	58,976	60	35,386	1.94
Укупно	3,462,835		2,628,758	

У наредном кораку, параметри који дефинишу ограничења техничког потенцијала за рециклажу су унете у симулациони модел. Као што је изнад наведено, технички потенцијал за рециклажу комуналног отпада представља однос између финалних количина рециклираног отпада и количина отпада које су прикупљене за процес рециклаже, што је у моделу квантификовано преко просечне стопе губитака (ALR). Просечна стопа губитака дефинише учешће нециљаних рециклабила у маси издвојеног материјала из комуналног отпада. Овај део отпада одлази на депонију или евентуално у друге третмане поновног искоришћења. Процентуалне вредности ових губитака по фракцијама отпада преузете су из литературе (Eunomia Research & Consulting, 2018) и приказане су у Табели 6.6. Поред ових вредности, у Табели 6.6 су приказане прорачунате вредности количина рециклираног отпада по фракцијама, као и пројектована максимална стопа рециклаже у 2035. години.

Табела 6.6 Оптимална стопа рециклаже за 2035. годину

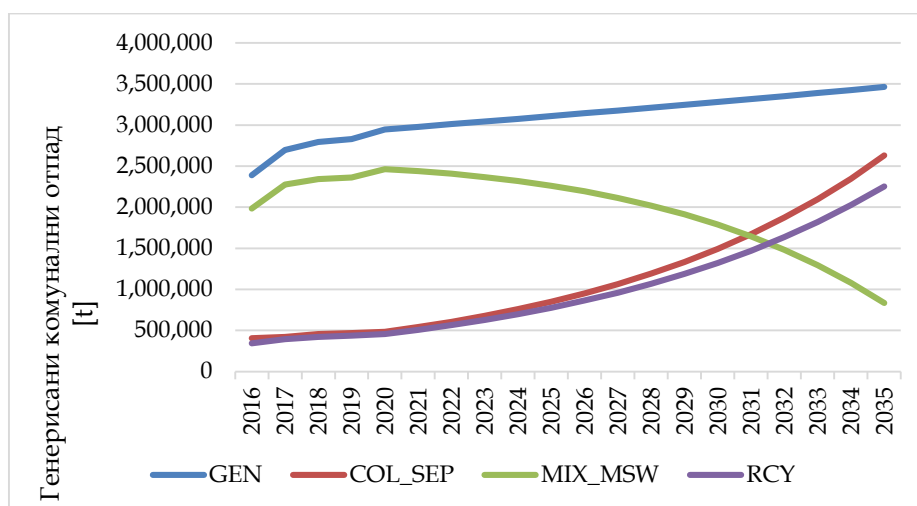
Фракција отпада	GEN 2035 (t)	COL_SEP 2035 (t)	ALR (%)	RCY 2035 (t)	RCY_R 2035 (%)
Метали	180,746	173,516	2	170,046	94.08
Стакло	141,965	109,313	6	102,754	72.38
Пластика	418,268	292,787	25	219,591	52.5
Папир и картон	449,731	431,742	15	366,980	81.6
Био-отпад	1,386,157	1,316,849	15	1,119,322	80.75
Дрво	116,814	50,230	7	46,714	39.99
Текстил	95,638	70,772	9	64,402	67.34
WEEE	195,844	146,883	12	129,257	66
Батерије	82	82	15	70	85
Кабастни отпад	1597	1197	7	1114	69.75
Мешани отпад	417,018	0	0	0	0
Остало	58,976	35,386	7	32,909	55.8
Укупно	3,462,835	2,628,758		2,253,158	65.07

Табела 6.7 приказује прорачунате вредности индикатора отпада за године од 2020. до 2035. Анализом података добијених симулацијом сценарија максималног рециклажног потенцијала, може се закључити да сектор комуналног отпада Републике Србије може да достигне постављене циљеве стопе рециклаже ЕУ у 2035. години, само у случају достизања максималних стопа примарне сепарације по фракцијама отпада.

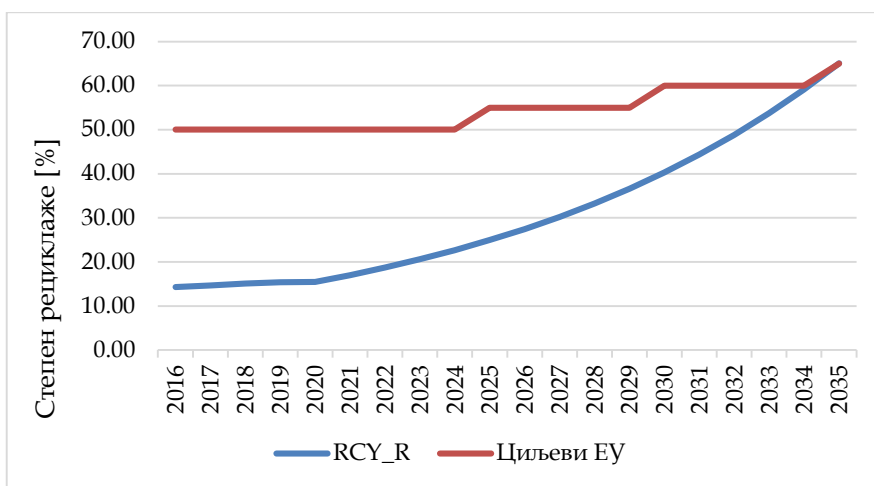
Табела 6.7 Индикатори комуналног отпада прорачунати за сценарио оптималног рециклажног потенцијала

Индикатор	2020	2025	2030	2035
Генерисани комунални отпад (t)	2,947,496	3,110,136	3,281,751	3,462,835
Генерисани комунални отпад по глави становника (kg/st)	427	451	476	502
Раздвојени прикупљени отпад (t)	482,515	849,070	1,494,089	2,628,758
Прикупљени мешани отпад (t)	2,464,981	2,261,066	1,787,662	834,077
Рециклирани отпад (t)	455,457	775,090	1,319,036	2,253,158
Стопа рециклаже (%)	15.45	24.92	40.19	65.07

Слика 6.6а показује добијене резултате нумеричког прорачуна за укупну количину генерисаног комуналног отпада (GEN), сакупљеног мешаног отпада (Mix_MSW), раздвојено прикупљеног отпада (COL_SEP), и рециклираног отпада (RCY) у сценарију оптималног рециклажног потенцијала за период од 2016. до 2035. године.



Слика 6.6а Сценарио оптималног рециклажног потенцијала и вредности: GEN, COL_SEP, MIX_MSW и RCY (Jovičić, et al., 2022)



Слика 6.6б Однос стопе рециклаже у сценарију за оптимални рециклажни потенцијал и прописаних циљева ЕУ (Јовичић, et al., 2022)

Слика 6.6б приказује добијене резултате расподеле стопе рециклаже комуналног отпада (RCY_R) за период од 2016. до 2035. године, и пореди је са прописаним циљевима (Циљеви ЕУ).

6.5. Ограничења и фрагилност система

У дефинисању главног ограничења система, сектор комуналног отпада је анализиран као целина са дефинисаним циљем. Једна од битних ставки у проналажењу главног ограничења система, је разумевање да циљ система дефинише и главно ограничење. Сектор комуналног отпада има два типа ограничења, једно у форми физичког протока материјала (различитих фракција отпада), као и ограничење у форми регулација и протока информација. Прво ограничење се налази између комуналних предузећа и сакупљача који шаљу раздвојени отпад на процес поновног искоришћења/рециклаже. Постојање овог ограничења је значајно што се може видети у квантитету протока отпада. Прилив отпада ка комуналним предузећима ((COL_PUC(КОМ1)) је износио 1,997,524 тоне у 2016. години и 2,481,712 тона у 2020. години (Табела 6.2), док одлив отпада на поновно искоришћење је износио 13,024 тоне у 2016. години и 16,731 тону у 2020. години. Као што је већ назначено, највећи пораст у продуктивности целокупног система, може бити постигнут кроз фокус развојних активности на најугроженије ограничење (Gupta, Boyd, 2008). У случају да држава одлучи да субвенционира или инвестира у нова постројења за рециклажу, иако наведена инвестиција може повећати капацитете рециклаже, ове активности заобилазе главно оперативно ограничење целокупног система, и самим тим би позитивне промене у перформансама целокупног система биле минималне.

Следеће ограничење у систему представља неформални сектор, који се може дефинисати као ограничење регулаторног или информационог типа. Сам сектор је нерегулисан и изолован од комуналних предузећа, као и од државних институција задужених за комунални отпад на територији Републике Србије. Овај сектор нема адекватан проток информација са комуналним предузећима,

као и са осталим државним органима, што креира информационо ограничење. Интеракција овог сектора је искључиво са приватним ентитетима који откупују рециклабилни отпад од неформалних сакупљача. За разлику од неформалног сектора, регистровани агенти у сектору комуналног отпада су у обавези да прецизно прикупљају и деле информације о њиховим операцијама.

Неформални сектор је одговоран за велики удео у протоку комуналног отпада у систему (COL_SEP(GIO6)). Као што је приказано у Табели 6.2, у 2020. години овај сектор је генерисао прилив од 305,000 тона рециклабила сакупљачима, што је 63.2% од целокупног прилива раздвојено сакупљеног комуналног отпада на поновно искоришћење/рециклажу. Као што је већ истакнуто, агенти у овом сектору су нерегулисани и не учествује у потпуности у прописаном прикупљању информација о својим активностима, па самим тим ови бројеви могу бити значајно већи.

Сам неформални сектор се може дефинисати као највећи извор ризика за перформансе целокупног система, и самим тим захтева анализу фрагилности. Постоји дефинисан приступ мерења фрагилности биланса стања финансијских институција или инвестиционих фондова (Taleb, et al., 2012), као и мерења фрагилности индустријских система или логистичких ланаца (Größler, 2020). У случају анализе неформалног сектора и да ли је овај сегмент извор фрагилности за цео систем, креиран је под-модел. Хеуристика за мерење фрагилности код неформалног сектора базирана је на адаптацији основне структуре коришћене у динамици система (De Bruijn, Größler, Videira, 2019). У моделима креираним у динамици система, нелинеарни ефекти су учестали феномен због коришћења структуре повратних петљи, функција застоја и нивоа. Креирани модел има велики број повратних петљи, као и функција застоја ка циљу да што боље симулира понашање стварног система. Сама структура модела је адекватна да укаже на извор фрагилности, као и на потенцијалне губитке. Модел је адаптиран да мери фрагилност и кроз коришћење структуре и функција за дефинисање носећих капацитета (carrying capacity). Коришћење структуре носећих капацитета је уобичајена пракса у креирању динамичких модела поготову у случају да се анализира одрживост биолошког система (Feng, Zhang, Luo, 2008). Динамичко понашање које се може очекивати кроз коришћење структура носећих капацитета је да, ако је систем изложен стресорима за које није адекватно оспособљен, конвексан пораст у губицима је очекиван, уз немогућност система да се брзо опорави (De Bruijn, Größler, Videira, 2019).

Одабрани сценарио за анализу је ликвидација неформалног сектора, кроз агресивну регулаторну политику. Овај сценарио налаже прекид свих илегалних активности овог сектора у прикупљању и раздвајању комуналног отпада, као и процес регистрације и легализације агената који сачињавају овај сектор. Плава област на Слици 6.7 представља популацију агената неформалног сектора, док црвена област на дијаграму представља популацију неформалних агената који су постали део регистрованог сектора и наставили своје активности легалним путем. Процес ликвидације има за циљ обуставу илегалних активности сакупљања, сепарације као и складиштења отпада од стране агената који нису регистровани. Само илегално складиштење раздвојеног отпада креира низ

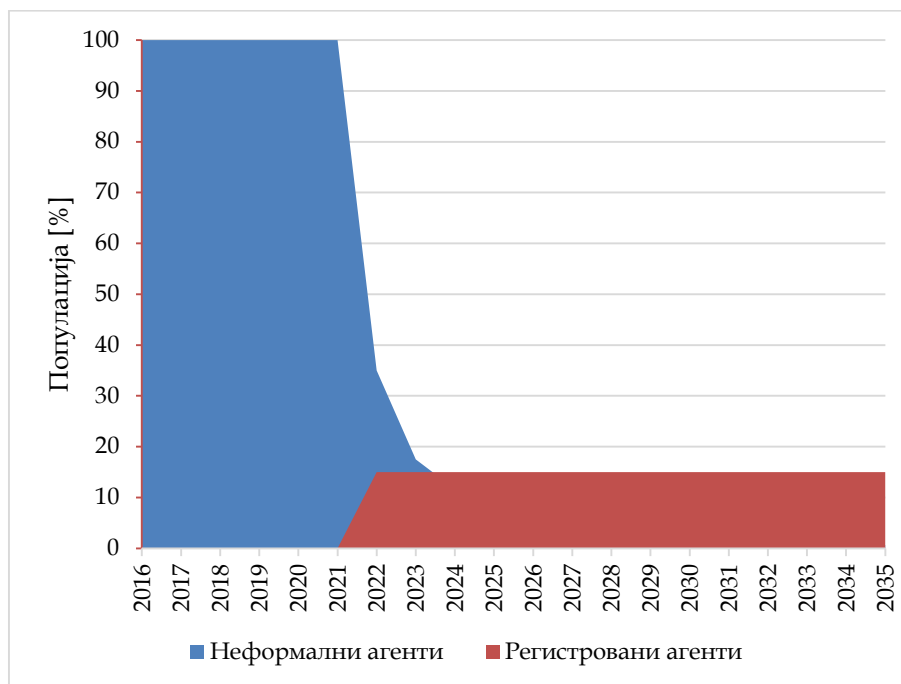
проблема у сектору, где је отежано да се формира јасна слика о стању и протоку комуналног отпада, као и креирање еколошких и безбедоносних хазарда.

Иако постоји низ еколошких, регулаторних и економских престапа који указују да илегалне активности овог сектора морају бити прекинуте у што краћем временском периоду, симулација указује на извор фрагилности за цео систем. Као што је приказано на Слици 6.7. конкавни пад популације која функционише у овом сектору је очекивана појава, где би већина агената овог сектор била перманентно одстрањена из активности прикупљања и раздвајања отпада.

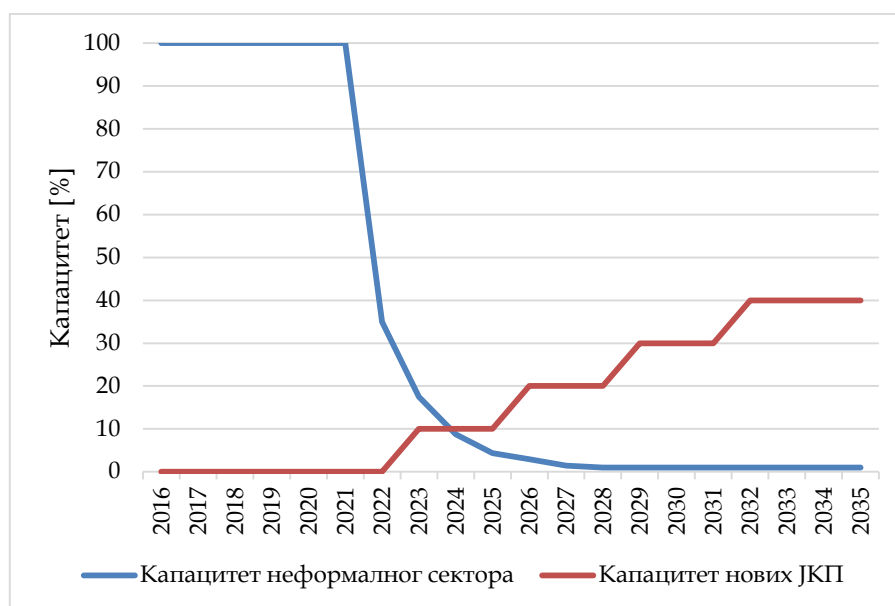
Као што је већ неведено, неформални сектор је одговоран за 63.2% целокупно раздвојено прикупљеног отпада, и сваки значајнији поремећај у овом сектору би проузроковао велике губитке у постројењима за рециклажу. Динамичко понашање приказано на дијаграму пада капацитета комуналног сектора и креирања новог капацитета од стране комуналних предузећа (Слика 6.8), базиран је на публикованим подацима везаним за Републику Србију, као и друге државе. Карактеристике неформалног сектора и могућности његове адаптације на промене су били предмет истраживања дуги низ година (De Paula, Scheinkman, 2007). Предмет многих истраживања везаних за неформални сектор, је и сагледавање сличности и разлика у функционисању формалног и неформалног сектора (Rauch, 1991). Све са циљем дефинисања бољих стратегија за транзицију и интеграцију у легалне економске активности. Приликом моделирања овог сектора појављују се одређене генеричке карактеристике које су присутне у свим државама где је неформални сектор истраживан: избегавање плаћања пореза, ниско обучена радна снага, велика разлика у примањима у односу на формални сектор и баријере за транзицију у легалне операције (Amaral, Quintin, 2006). Развијени под-модел прави процене о могућностима транзиције неформалног сектора, базиране на публикованим истраживањима неформалног сектора на територији Републике Србије (Krstic, Schneider, 2015). Пројектовани конкавни пад и недостатак опоравка броја агената у овом сектору, у случају агресивне регулаторне политике, заснован је и на транзиционим баријерама које су пре свега последица атрибута агената који сачињавају овај сектор попут: ниског нивоа писмености и изолованости од остатка система (Kogan, 2011), присуство високог нивоа сиромаштва и генералног недостатка ресурса (Blunch, 2015).

Симулацијом се долази до пројекције да ће, у кратком временском периоду, мали број агената неформалног сектора извршити транзицију из нерегулисане форме операција у формални сектор. Модел је дизајниран и да сагледава феномен транзиционих баријера, које се често појављују након великих регулаторних промена у секторима комуналног отпада (Massarutto, 2007) или приватизација јавних комуналних предузећа (Bel, Warner, 2008). Мала популација агената у неформалном сектору би била у могућности да превазиђе регулаторне и капиталне баријере, и самим тим би креирала ефекат економије обима (economies of scale), што би онемогућило остатак популације неформалног сектора да изврши транзицију и приступи истом тржишту. Као што је приказано на Слици 6.7. црвена област, тј. популација регистрованих агената расте, и након

тога остаје иста, што представља често ефекат креирања локалних монопола и баријера за друге агенте да приступе тржишту.



Слика 6.7 Ликвидација неформалног сектора (Јовичић, et al., 2022)



Слика 6.8 Пад у капацитету неформалног сектора и нови капацитет комуналних предузећа (Јовичић, et al., 2022)

На Слици 6.8, приказан је пад у капацитету неформалног сектора (плава линија), као и креирање новог капацитета комуналних предузећа (црвена линија) која покушавају да надокнаде губитке у примарној сепарацији отпада. Приликом симулације новог капацитета, моделирање је вршено у форми степ функција. Како би систем достигао минимални ниво одрживости, у сценарију где комунални сектор престаје да функционише, комунална предузећа морају

достигнути 40% капацитета неформалног сектора до 2024. године, када је пројектован колапс неформалног сектора. Након тог периода овај сектор би престао да доприноси на било који начин прикупљању и раздвојеном сакупљању отпада на територији Републике Србије. Дефинисана надокнада изгубљеног капацитета до 2024. године, може се дефинисати као подухват изузетно ниске вероватноће у реализацији. Битно је нагласити да би наведено подизање капацитета комуналних предузећа захтевало да се достигне прикупљање и сепарација отпада приближна 150,000 тона у 2024. години. То би значило остваривање раста од око десет пута у перформансама скупљања и сепарације отпада у односу на 2020. годину. Поред капиталних инвестиција од стране државе за реализацију надокнаде изгубљених капацитета, комунална предузећа би захтевала и одређени ниво реструктурирања у својим операцијама за значајно комплекснији систем рада. Модел је симулирао релативно конзервативан пораст у капацитетима прикупљања и сепарације отпада од стране комуналних предузећа. Дефинисани пораст у капацитету је заснован на спроведеним истраживањима, и генералном недостатку резервног капацитета комуналних предузећа на глобалном нивоу (Minakova, Bukreeva, Timofeeva, 2018). Такође, приликом моделирања система ЈКП-а и његових капацитета, коришћен је ДС структура која омогућава и ширу анализу перформанси система (Yamaguchi, 2013). Код система који немају значајну количину резервног капацитета, од кључног значаја је избегавање било какве политике која може довести до губитака, као у случају ликвидације операција дела комуналног сектора.

Табела 6.8 Преглед раздвојено сакупљеног комуналног отпада у сценарију за оптимални рециклажни потенцијал

Индикатор	2020	2025	2030	2035
Раздвојено прикупљени отпад (t)	482,515	849,032	1,493,954	2,628,758
-Комунална предузећа (t)	16,731	29,440	51,802	91,151
-Неформални сектор (t)	305,000	536,676	944,334	1,661,647
-Генератори отпада (t)	160,784	282,917	497,819	875,961

Улога неформалног сектора у постизању рециклажних циљева ЕУ је очигледна. На основу података приказаних у Табели 6.8, за анализирани период од 15 година, највећи удео раздвојено прикупљеног комуналног отпада је последица активности овог сектора. Битно је истаћи да се приказани тренд може окарактерисати као високо неизван и пре свега неодржив. Као што је већ формулисано, неформални сектор је нерегулисан од стране државе, и саме активности прикупљања и сепарације отпада овог сектора су у великој мери илегалне. Сходно ниском надзору државних агенција задужених за сектор комуналног отпада, очекивања су ниска да ће се овај сектор усклађивати са потребама постизања државних циљева. Различити ризици су константно

присутни код операција неформалног сектора, без обзира на чињеницу да он свакодневно функционише у интеракцији са агентима формалног сектора (Katusiimeh, Burger, Mol, 2012).

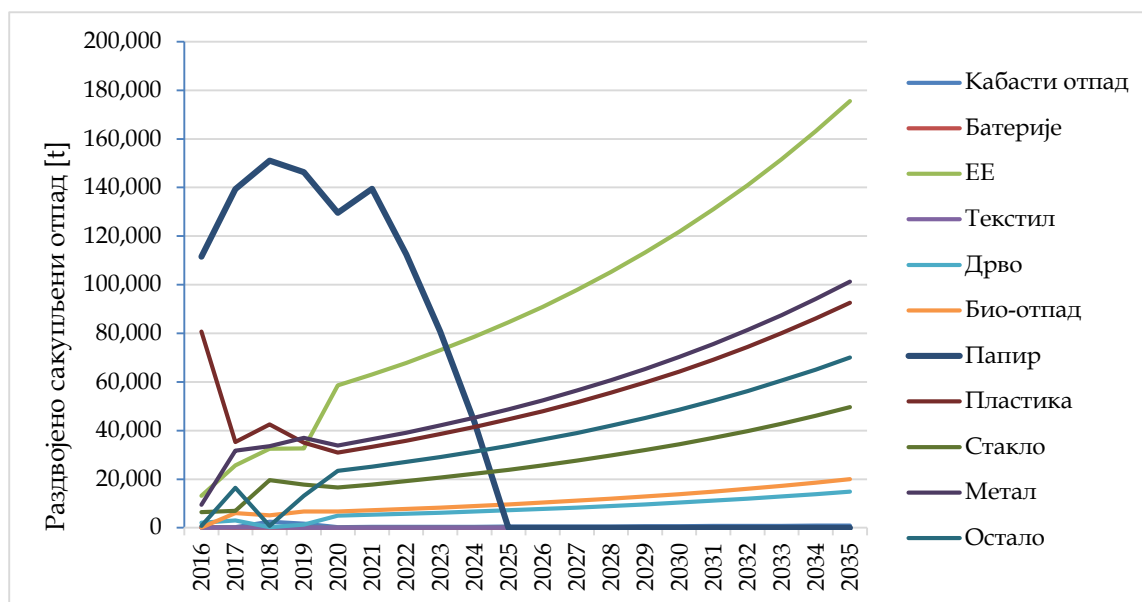
Врло је уобичајено да регулаторне агенције, у државама у развоју, користе агресивну регулаторну политику према неформалном сектору, све са циљем “програма модернизације” (Ezeah, Fazakerley, Roberts, 2013). Процењено је да до 2% популације која живи у урбаним срединама земаља у развоју, учествује у активностима прикупљања и раздвајања отпада. Такође, ове активности могу представљати главни извор прихода за ову популацију (Medina, 2007). Битно је узети у обзир да, било које агресивне регулаторне политике према неформалном сектору, могу имати и нежељене социо-економске ефекте према значајном проценту популације. Постоје значајни резултати у подизању продуктивности, постигнути кроз имплементирање програма подршке неформалном сектору, од стране невладиних организација (Zia, Devadas, Shukl, 2008). Програми ове врсте фокусирани су на повећању ефикасности у прикупљању отпада, као и успостављању боље размене података са формалним сектором. Неформални сектор, који је ефикаснији и боље интегрисан у целокупни систем, остварив је кроз адекватне развојне иницијативе које захтевају време, као и капиталне инвестиције.

6.5.1 Анализа фрагилности комуналног сектора на парцијалну ликвидацију активности

Кроз генерисану симулацију под-модела, утврђено је да стратегија државе по питању неформалног сектора мора бити фокусирана на избегавање наглих промена и агресивних регулаторних политика. Неформални сектор у моделу, као и у реалном систему, покрива прикупљање и раздвајање свих 12 фракција комуналног отпада. Иако популације агената комуналног сектора покривају свих 12 фракција комуналног отпада, у неформалном сектору постоји специјализација за одређене фракције, усмерена на процесе: прикупљања, раздвајања, складиштења и даљу продају. Државна регулаторна политика на глобалном нивоу има тенденцију да регулише и потискује операције неформалног сектора за одређене фракције отпада, обично за оне које држава препознаје као економски битним за поновно искоришћење (Ezeah, Fazakerley, Roberts, 2013). Иако стратегија заустављања нерегистрованих активности за одређену фракцију отпада, делује као значајно боља алтернатива од генералног обустављања неформалног сектора, на дуже стазе, овај приступ се, такође, може окарактерисати као фрагилан, са великим бројем контра-ефеката (Goldstein, 2016).

Један од честих сегмената комуналног отпада који државе желе да регулишу је фракција папира и картона, која је често дефинисана као економски и еколошки битна фракција комуналног отпада (Medina, 2008). Симулација процеса обуставе рада операција прикупљања, раздвајања и складиштења папира и картона у комуналном сектору приказана је на Слици 6.9. Једна од претпоставки спроведене симулације је да популације агената које су под

притиском престале да учествују у операцијама везаним за фракцију папира и картона, своје активности преусмеравају на друге фракције комуналног отпада. Као што је приказано на Слици 6.9, процес обуставе рада операција везаних ја фракцију папира и картона би трајао 4 године, док би остале фракције комуналног отпада задржале свој пројектовани раст. Није неочекивано да агенти неформалног сектора направе транзицију ка прикупљању фракције отпада која је профитабилнија, мање кабаста и самим тим једноставнија за складиштење, као што је електрични и електронски отпад (Chi, et. al., 2014). Транзиција неформалних агената да ексклузивно прикупљају електрични и електронски отпад је чест феномен (Chi, et. al., 2014; Prasad, et. al., 2021). У симулационом моделу формиран су лимити раста за остатак фракција комуналног отпада. Постоји евидентан недостатак података да би се са сигурношћу дефинисао тренд у прикупљању и сепарацији осталих фракција отпада, ако би се операције везане за папир и картон обуставиле. Модел је узео у обзир конзервативне параметре раста. Међутим, ефекат који може бити очекиван је генерални пад у стопи рециклаже за целокупни сектор комуналног отпада. Разлог за пад у укупној стопи рециклаже произилази из неизвесности да остатак система, попут комуналних предузећа, или осталих приватних агената који учествују у прикупљању или сепарацији отпада, надокнаде изгубљени капацитет у фракцији папира и картона. Под параметрима базне симулације може се увидети да би комунални сектор у случају прекида операција везаних за папир и картон, смањио свој удео у раздвојеном прикупљеном отпаду за приближно једну трећину, у периоду од 2016. до 2035. године. Неформални сектор би кумулативно за анализирани период проследио 6,184,961 тона отпада свих фракција, што представља значајан пад у односу на прослеђених 9,085,213 тона отпада, у условима без обуставља операција везаних за папир и картон.



Слика 6.9 Обустава операција везаних за прикупљање и раздвајање папира и картона (Јовичић, et al., 2022)

Иако је стратегија фокусирана на само једну фракцију отпада из операција комуналног сектора, губитак у укупној стопи рециклаже може бити значајан. Није извесно да постоји адекватна инфраструктура формалног сектора која може да замени капацитете неформалног сектора у процесима: прикупљања, сепарације, складиштења и даљег прослеђивања отпада сакупљачима. Алтернатива за стратегије обуставе активности прикупљања селектованих фракција отпада, или свих операција неформалног сектора, је постепена транзиција и интеграција овог сектора у систем. Постоји низ стратегија фокусираних на обуку и креирање инфраструктуре за прикупљање и размену података код неформалног сектора (Medina, 2008).

7. ЗАКЉУЧАК

Примена алата из области менаџмента ризиком је од кључног значаја код компанија и организација, без обзира на њихову величину. Код мањих компанија присуство ризика које може довести до престанка рада компаније је значајно веће у односу на велике компаније или корпорације. Историјски гледано јако мали број малих и средњих предузећа реализује животни век од деценију или дуже (Mauboussin, et al., 2017). Иако велике компаније и корпорације, имају значајно веће ресурсе, као и бољи приступ финансирању у односу на мање привредне субјекте, и код ових економских ентитета постоје различите врсте ризика које могу довести до колапса система. Животни век најуспешнијих и највећих светских корпорација, бележи пад у периоду од 60-их година прошлог века па до првих деценија 21. века (Anthony, et al., 2018). Очекивано је да ће се овај тренд наставити, као последица развоја нових економија на светском нивоу, и самим тим порастом конкуренције. Отуда важност алата за управљање ризиком, постаје све већа.

Научна област менаџмента ризиком прошла је кроз низ еволуционих фаза, међутим глобална финансијска криза 2008. године, указала је на недостатке конвенционалних алата за процену и митигацију ризика (Jovičić, et al., 2019). Бројна истраживања су указала да компаније, као и институције често користе методе за анализу ризика, као и да многе конвенционалне методологије које су из теорије извршиле транзицију у индустријску примену, имају лоше резултате у управљању ризиком (Hubbard, 2009). Разумевање ограничења и ниске поузданости многих метода у предвиђању високо утицајних негативних догађаја, мора бити приоритет сваког корпоративног и институционог програма за контролу ризика. Многе методе за анализу ризика су показале високу ефикасност у предвиђању и превенцији учесталих и мање утицајних ризика, док наведена ефикасност ових метода није присутна код ризика који креирају велике губитке и потенцијални колапс система (Jovičić, et al., 2019). Коришћење симулационих метода може бити од велике користи у процесу сагледавања на које начине анализирани систем може генерисати велике губитке. Такође, симулационе технологије пружају низ могућности у процесу превенције и митигације ризика. Битно је назначити да примена симулационих модела, не заобилази ограничења у прецизној предикцији реализације нежељених догађаја. Кроз докторску дисертацију приказане су могућности симулационих методологија да допринесу у процесу анализе ризика различитих система. Симулационе методологије попут динамике система, могу имати значајан допринос у анализи динамичког понашања комплексних система. Коришћење динамике система, симулација дискретних догађаја и симулација заснованим на агентима, у комбинацији са алатима за процену и митигацију ризика, може бити од великог значаја у потпуњавању лимитација конвенционалног приступа анализе ризика.

Докторска дисертација је сагледала могућности развоја новог алата за процену ризика код компанија и институција, који би био интегрисан са

симулационим методологијама. Анализа фрагилности система није нашла велику примену изван финансијског сектора, где се показала као изузетно ефикасан приступ за идентификацију слабости система на неизвесне догађаје и стресоре. Кроз докторску дисертацију показано је да је ова метода лако примењива код различитих врста економских ентитета. Анализа фрагилности је хеуристичка метода и самим тим може бити адаптирана за примену на различите врсте компанија, ланаца снабдевања, институција као и већих система. У оквиру докторске дисертације анализирани су LEAN системи и њихова фрагилност. Кроз креиране симулационе моделе указано је на пар ограничења LEAN система, превасходно њиховом недостатку резервних или бафер залиха и капацитета. Недостатак бафер залиха представља генералну лимитацију LEAN система да боље реагују у условима нежељене волатилности (Sarkis, 2020). Такође потреба за балансирањем капацитета која је учестала у LEAN системима треба бити сагледавана као лоша стратегија која чини целокупни систем фрагилним (Goldratt and Cox, 2005).

Код анализираних система болнице, указано је на висок степен фрагилности система на линеарно повећавање нежељеног стресора. Као што је већ истакнуто, фрагилни системи имају конкаван пад перформанси, приликом промене динамике стресора. Предмет истраживања докторске дисертације је било и сагледавање систематске фрагилности која је често присутна код здравствених система. Такође, болнице се често класификују као високо-оптимизовани LEAN системи. Истраживања указују на потенцијално повећање стреса код запослених у LEAN окружењу (Нуро, Voxall, 2018). Креирани симулациони модел прорачунава и ефекте стреса на медицинске грешке, које представљају битан фактор ризика у здравственим системима (Gawande, 2010). LEAN системи имају тенденцију да креирају радно окружење које има већи интензитет рада, што може креирати повећање фактора стреса код запослених (Нуро, et al., 2022), креирани модел указује на фрагилност система у условима високог интензитета рада. Модел LEAN медицинског система приказује важност резервних капацитета у медицинским радницима, као и у ресурсима личне заштите.

Циљ докторске дисертације био је да се кроз мулти-дисциплинаран приступ анализира фрагилност сектора комуналног отпада Републике Србије. Креирани модел сагледава целокупни систем комуналног отпада, сачињен од више агената који испуњавају прецизно дефинисане захтеве система. Фокус на одређени сегмент система може бити од користи при оптимизацији анализираних сегмената, међутим, оптимални начин за унапређење целокупног система је кроз сагледавање свих елемената и њиховог утицаја на перформансе целокупног система. Тим путем, идентификација главног уског грла и највећег извора ризика је могућа. Кроз истраживање генерисан је графички приказ целокупног сектора комуналног отпада, са добро дефинисаним границама модела. Дефинисање граница модела, и селекција најрелевантнијих варијабли је од великог значаја при изради модела којим се анализира функционисање целокупног сектора (Sterman, 2000). Графички приказ сектора комуналног отпада, као и коришћени скупови података за нумеричке симулације, креирани су у сарадњи са Агенцијом за заштиту животне средине Републике Србије.

Генерисани нумерички скупови података кроз модел, даље су обрађивани кроз квантитативне анализе. Велика важност је стављена на прецизно дефинисање интеракција између различитих агената у моделу. Разлог за то је што разумевање свих интеракција у протоку материјала и информација између свих учесника у систему, може представљати изазов чак и за стекхолдере.

У сарадњи са Агенцијом за заштиту животне средине, дефинисани су кључни индикатори за мерење перформанси сектора комуналног отпада у постизању циљева постављених од стране ЕУ и Републике Србије. Сви индикатори перформанси су моделирани у динамичком моделу, и дефинишу циљеве свих спроведених симулација. Модел је прошао процес верификације и валидације, уз спровођење анализе осетљивости (*sensitivity analysis*). Ка циљу постизања адекватне прецизности модела, границе модела су постављене да не обухватају непотребне податке везане за динамику популације Републике Србије и макроекономске податке. Након валидације нумеричког модела, генерисан је базни сценарио као и сценарио достизања оптималне стопе рециклаже. Оба сценарија указују на очигледна оперативна ограничења сектора комуналног отпада да се достигну постављени циљеви ЕУ. Чак и у случају да су генерисани сценарији недовољно прецизни у својим пројекцијама, њихов допринос је значајан у указивању на кључни ограничавајући фактор система. Модел указује на однос неформалног сектора и јавних комуналних предузећа, као главно ограничење и извор ризика у постизању постављених циљева за 2035. годину. Поред макро модела сектора комуналног отпада, креиран је и под-модел за анализу динамичког понашања комуналног сектора и његове интеракције са јавним комуналним предузећима. Након што је кључни ограничавајући фактор у симулационом моделу система идентификован, низ бенефита може проистећи из даље надоградње модела, тј. моделирања и проширења структуре главног ограничавајућег фактора. Ограничења симулационих модела у прецизном предвиђању динамичког понашања система далеко у будућност (Makridakis, Taleb, 2009), могу бити занемарене ако се модел превасходно користи за идентификацију оперативних ограничења и извора фрагилности. Једини начин где симулациони модел може генерисати непоуздане податке о најугрожавнијем ограничењу система и највећем извору фрагилности, је сценарио у којем је структура модела погрешно конципирана. Овакви модели превасходно требају бити коришћени као алат подршке у менаџерском одлучивању. У случају анализе фрагилности корпорације или великог ланца снабдевања, макро модел би требао да обухвата више финансијских параметара као и структуру која симулира људске ресурсе. У креираном моделу финансијски подаци операција различитих агената сектора комуналног отпада, као и макро-економски подаци Републике Србије нису од круцијалне важности у анализи изводљивости постизања дефинисаних циљева. У случају да модел анализира имплементацију различитих стратегија подизања капацитета комуналних предузећа, или неког другог сегмента у моделу, моделирање економских фактора, као и капацитета људских ресурса је од кључног значаја.

Креирани модел садржи различите сценарије за сектор комуналног отпада Републике Србије. Циљ модела је сагледавање могућности сектора да достигне прописане циљеве стопе рециклаже, уз анализу кључног ограничења и

извора ризика за целокупни сектор. Симулације указују на неформални сектор као главни извор фрагилност за целокупни систем, као и на највећи извор неизвесности у достизању циљева у периоду од 2016. до 2035. године. Наведени закључци указују да се јако мало може очекивати од промена које нису фокусиране на реструктурирање операција неформалног сектора, његове интеракције са комуналним предузећима. Сценарио оптималног рециклажног потенцијала указује на могућности система да достигне циљеве постављене од стране Европске уније за 2035. годину. Сви симулирани сценарији указују на зависност целокупног система од неформалног сектора. Базни сценарио процењује укупну стопу рециклаже од 39.35% у 2035. години, која представља неадекватну опцију за сектор комуналног отпада.

Креирани под-модел сагледава опцију за брзо решавање ризика нерегулисаног неформалног сектора, која је потенцијална ликвидација свих законом не-прописаних активности прикупљања и сепарације отпада. Самим тим, операције неформалног сектора би биле обустављене на територији Републике Србије. Међутим, као што је пројектовано симулацијом, политика агресивне ликвидације и регулације овог сектора представља високо ризичну стратегију за цео сектор. Кроз симулирање ликвидације неформалног сектора указано је на лимитиране могућности комуналних предузећа да надокнаде изгубљени капацитет у примарној сепарацији отпада. Комунална предузећа представљају комплексан логистички систем, где повећање капацитета може захтевати значајне капиталне инвестиције.

Неформални сектор је окарактерисан као извор фрагилности за целокупни систем, који није спреман за нагле промене. Дисрупција операција овог сектора може довести до значајног губитка продуктивности целокупног сектора у сепарацији и рециклажи одређених фракција отпада. Такође, битно је истаћи постојање велике неизвесности у могућности надокнаде изгубљеног капацитета неформалног сектора, од стране регистрованих агената у систему.

Истраживањем у оквиру ове докторске дисертације дошло се до закључка да мапирање и анализа целокупног комплексног система може бити од велике користи, како за бољу едукацију и доношење одлука стејкхолдера, тако и регулаторних доносилаца одлука који можда немају адекватну слику операција целокупног система. Анализа фрагилности може бити ефикасно коришћена, како за финансијске ентитете (банке, инвестиционе фондове, осигуравајућа друштва, холдинг компанијеи сл.), тако и за компаније и организације које нису у сектору финансија. Динамика система пружа адекватне симулационе могућности у анализирању фрагилности различитих система, кроз коришћење основне структуре ове симулационе методологије, попут повратних петљи и структура носећег капацитета. Стејкхолдери који су били укључени у истраживање нису имали потешкоћа у разумевању структуре нивоа и протока модела, као и сценарија које модел симулира, што указује на могућности коришћења анализе фрагилности као менаџерског алата за доношење одлука у менаџерским операцијама.

8. ЛИТЕРАТУРА

Abdel-Hamid, T. K., & Madnick, S. E. (1990). The elusive silver lining: how we fail to learn from failure in software development.

Abdel-Hamid, T., & Madnick, S. E. (1991). Software project dynamics: an integrated approach. Prentice-Hall, Inc..

Aday, S., & Aday, M. S. (2020). Impact of COVID-19 on the food supply chain. *Food Quality and Safety*, 4 (4), 167-180.

Aghazadeh, S. M. (2003). JIT inventory and competition in the global environment: a comparative study of American and Japanese values in auto industry. *Cross Cultural Management: An International Journal*.

Al-Hasan, S. J. A., Balamuralikrishnan, R., & Altarawneh, M. (2020). Eco-friendly asphalt approach for the development of sustainable roads. *Journal of Human, Earth, and Future*, 1(3), 97-111.

Amaral, P. S., & Quintin, E. (2006). A competitive model of the informal sector. *Journal of monetary Economics*, 53(7), 1541-1553.

Angerhofer, B. J., & Angelides, M. C. (2000, December). System dynamics modelling in supply chain management: research review. In 2000 Winter Simulation Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37165) (Vol. 1, pp. 342-351). IEEE.

Andelkovic, P. M., Andelkovic, A., & Dasic, P. (2013). The theory of constraints as a basis for production process improvement model. *Актуальні проблеми економіки*, (10), 251-260.

Anderson, S. C., Branch, T. A., Cooper, A. B., & Dulvy, N. K. (2017). Black-swan events in animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(12), 3252-3257.

Annamalah, S., Raman, M., Marthandan, G., & Logeswaran, A. K. (2018). Implementation of enterprise risk management (ERM) framework in enhancing business performances in oil and gas sector. *Economies*, 6(1), 4.

Anthony, S. D., Viguerie, S. P., Schwartz, E. I., & Van Landeghem, J. (2018). 2018 Corporate longevity forecast: Creative destruction is accelerating. INNOSIGHT Holdings, LLC, Boston, MA, Feb.

Annual Report on the State of the Environment in the Republic of Serbia for 2020; Serbian Environmental Protection Agency: Beograd, Serbia, 2020. (In Serbian)

Asch, D. A., Sheils, N. E., Islam, M. N., Chen, Y., Werner, R. M., Buresh, J., & Doshi, J. A. (2021). Variation in US hospital mortality rates for patients admitted with COVID-19 during the first 6 months of the pandemic. *JAMA internal medicine*, 181(4), 471-478.

Aslani, A., Helo, P., & Naaranoja, M. (2014). Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: System dynamics approach. *Applied energy*, 113, 758-765.

Aven, T. (2013). On the meaning of a black swan in a risk context. *Safety science*, 57, 44-51.

Aven, T. (2015). The concept of antifragility and its implications for the practice of risk analysis. *Risk analysis*, 35(3), 476-483.

Azab, A., & AlGeddawy, T. (2012). Simulation methods for changeable manufacturing. *Procedia CIRP*, 3, 179-184.

Baluch, N. H., Abdullah, C. S., & Mohtar, S. (2012). TPM and lean maintenance-A critical review. *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business (IJCRB)*, 4(2), 850-857.

Bandyopadhyay, S., Baticulon, R. E., Kadhum, M., Alser, M., Ojuka, D. K., Badereddin, Y., ... & Khundkar, R. (2020). Infection and mortality of healthcare workers worldwide from COVID-19: a systematic review. *BMJ global health*, 5(12), e003097.

Baranov, V. V., Zaytsev, A. A., Zaytsev, A. V., & Sedlář, J. (2010). The Concept of Lean Production as a Part of the Enterprise's Strategic Management. *Kreativnaya Ekonomika*, 117-126.

Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 12(3), 183-210.

Barykin, S. Y., Bochkarev, A. A., Kalinina, O. V., & Yadykin, V. K. (2020). Concept for a supply chain digital twin. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 5(6), 1498.

Barjaktarović, L. (2009). *Upravljanje rizikom*. Univerzitet Singidunum.

Barlas, Y. (2007). Leverage points to march “upward from the aimless plateau”. *System Dynamics Review*, 23(4), 469-473.

Bastos, L. S., Ranzani, O. T., Souza, T. M. L., Hamacher, S., & Bozza, F. A. (2021). COVID-19 hospital admissions: Brazil's first and second waves compared. *The Lancet Respiratory Medicine*, 9(8), e82-e83.

Baud, I. S. A., Grafakos, S., Hordijk, M., & Post, J. (2001). Quality of life and alliances in solid waste management: contributions to urban sustainable development. *Cities*, 18(1), 3-12.

Ruth, M., & Hannon, B. (1997). Modeling dynamic biological systems. In *Modeling dynamic biological systems* (pp. 3-27). Springer, New York, NY.

Birkmeyer, J. D., Barnato, A., Birkmeyer, N., Bessler, R., & Skinner, J. (2020). The impact of the COVID-19 pandemic on hospital admissions in the United States: study examines trends in US hospital admissions during the COVID-19 pandemic. *Health Affairs*, 39(11), 2010-2017.

Bécue, A., Maia, E., Feeken, L., Borchers, P., & Praça, I. (2020). A new concept of digital twin supporting optimization and resilience of factories of the future. *Applied Sciences*, 10(13), 4482.

Bel, G., & Warner, M. (2008). Does privatization of solid waste and water services reduce costs? A review of empirical studies. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(12), 1337-1348.

Blunch, N. H. (2015). Bound to lose, bound to win? The financial crisis and the informal-formal sector earnings gap in Serbia. *IZA Journal of Labor & Development*, 4(1), 1-34.

Borshchev, A., & Filippov, A. (2004, July). From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In *Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society* (Vol. 22, pp. 25-29).

Brailsford, S., Churilov, L., & Dangerfield, B. (Eds.). (2014). *Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making*. John Wiley & Sons.

Bortolotti, T., Boscari, S., & Danese, P. (2015). Successful lean implementation: Organizational culture and soft lean practices. *International Journal of Production Economics*, 160, 182-201.

Bortolini, R. F., Cortimiglia, M. N., Danilevicz, A. D. M. F., & Ghezzi, A. (2018). Lean Startup: a comprehensive historical review. *Management Decision*.

Brailsford, S. C. (2007, December). Tutorial: Advances and challenges in healthcare simulation modeling. In *2007 Winter Simulation Conference* (pp. 1436-1448). IEEE.

Bromiley, P., McShane, M., Nair, A., & Rustambekov, E. (2015). Enterprise risk management: Review, critique, and research directions. *Long range planning*, 48(4), 265-276.

Brooks, R., Kotiadis, K., & Van Der Zee, D. J. (2010). Conceptual modeling for discrete-event simulation (Vol. 59). S. Robinson (Ed.). Boca Raton: CRC press.

Cavana, R. Y., Dangerfield, B. C., Pavlov, O. V., Radzicki, M. J., & Wheat, I. D. (Eds.). (2021). *Feedback Economics: Economic Modeling with System Dynamics*. Springer.

Camerer, C. F., & Johnson, E. J. (1997). 10 The process-performance paradox in expert judgment: How can experts. *Research on judgment and decision making: Currents, connections, and controversies*, 342.

Čihák, M. (March 2007). Introduction to applied stress testing. Working Paper, International Monetary Fund, 59

Chancellor, E. (Ed.). (2016). *Capital Returns: Investing Through the Capital Cycle: A Money Manager's Reports 2002-15*. Springer.

Chen, S., Chen, B., & Fath, B. D. (2013). Ecological risk assessment on the system scale: a review of state-of-the-art models and future perspectives. *Ecological Modelling*, 250, 25-33.

Chen, N., Zhou, M., Dong, X., Qu, J., Gong, F., Han, Y., ... & Wei, Y. (2020). J.'. Xia, T. Yu, X. Zhang and L. Zhang, Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study. *The Lancet*, 395(10223), 507-513.

Chi, X., Wang, M. Y., & Reuter, M. A. (2014). E-waste collection channels and household recycling behaviors in Taizhou of China. *Journal of Cleaner Production*, 80, 87-95.

Chortane, S. G., & Pandey, D. K. (2022). Does the Russia-Ukraine war lead to currency asymmetries? A US dollar tale. *The Journal of Economic Asymmetries*, 26, e00265.

Choopojcharoen, T., & Magzari, A. (2012). Mathematics behind system dynamics. *Worcester Polytechnic Institute*.

Chung, S. S., & Lo, C. W. (2008). Local waste management constraints and waste administrators in China. *Waste Management*, 28(2), 272-281.

Clancy, T. R. (2008). Control: What we can learn from complex systems science. *JONA: The Journal of Nursing Administration*, 38(6), 272-274.

Clancy, T. R. (2014). Handle with care: the fragile nature of complex systems. *JONA: The Journal of Nursing Administration*, 44(12), 628-631.

Clancy, T. R. (2015). Complexity, Flow, and Antifragile Healthcare Systems. *The Journal of Nursing Administration*, 45(4), 188-191.

Cooper, I., Mondal, A., & Antonopoulos, C. G. (2020). A SIR model assumption for the spread of COVID-19 in different communities. *Chaos, Solitons & Fractals*, 139, 110057.

Commission Implementing Decision (EU) 2019/1004 of 7 June 2019 Laying down Rules for the Calculation, Verification and Reporting of Data on Waste in Accordance with Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council and re-pealing Commission Implementing Decision C (2012) 2384. 2019. Available online: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2019/1004/oj (accessed on 12 October 2021).

Commission Decision 2011/753/EU of 18 November 2011 Establishing Rules and Calculation Methods for Verifying Compliance with the Targets set in Article 11(2) of Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council. 2011. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32011D0753> (accessed on 12 October 2021).

Dadzie, D. K., Kaliluthin, A. K., & Kumar, D. R. (2020). Exploration of waste plastic bottles use in construction. *Civil Engineering Journal*, 6(11), 2262-2272.

Daine, T., Winnington, T., & Head, P. (2011). Transition from push to pull in the wholesale/retail sector: lessons to be learned from lean. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 8(2), 214-232.

Daniels, C. B., & LaMarsh, W. J. (2007, April). Complexity as a cause of failure in information technology project management. In 2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering (pp. 1-7). IEEE.

Davahli, M. R., Karwowski, W., & Taiar, R. (2020). A system dynamics simulation applied to healthcare: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16), 5741.

de Bruijn, H., Größler, A., & Videira, N. (2020). Antifragility as a design criterion for modelling dynamic systems. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(1), 23-37.

De Paula, A., & Scheinkman, J. A. (2007). *The informal sector*. National Bureau of Economic Research Cambridge, Mass., USA.

Diehl, E., & Sterman, J. D. (1995). Effects of feedback complexity on dynamic decision making. *Organizational behavior and human decision processes*, 62(2), 198-215.

Dimov, D., & De Clercq, D. (2006). Venture capital investment strategy and portfolio failure rate: A longitudinal study. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 30(2), 207-223.

Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives; Amended by Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018. Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.150.01.0109.01.ENG (accessed on 10 October 2021).

Hubbard, D. W. (2020). *The failure of risk management: Why it's broken and how to fix it*. John Wiley & Sons.

Duncan, I. G. (2011). *Healthcare risk adjustment and predictive modeling*. Actex Publications.

Đekić, I. (2012). LEAN Manufacturing in Two Serbian Food Companies - Case Studies. *International Journal for Quality Research*, 6(2).

Edomah, N. (Ed.). (2020). *Regional Development in Africa*. BoD-Books on Demand.

Eisenmann, T. R., Ries, E., & Dillard, S. (2012). Hypothesis-driven entrepreneurship: The lean startup. *Harvard Business School Entrepreneurial Management Case*, (812-095).

Enholm, I. M., Papagiannidis, E., Mikalef, P., & Krogstie, J. (2021). Artificial intelligence and business value: a literature review. *Information Systems Frontiers*, 1-26.

Etges, A. P. B. D. S., de Souza, J. S., Kliemann Neto, F. J., & Felix, E. A. (2019). A proposed enterprise risk management model for health organizations. *Journal of Risk Research*, 22(4), 513-531.

Ezeah, C., Fazakerley, J. A., & Roberts, C. L. (2013). Emerging trends in informal sector recycling in developing and transition countries. *Waste management*, 33(11), 2509-2519.

Eurostat. Municipal Waste Statistics—Statistics Explained. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics (accessed on 10 November 2019).

Fetter, R. B., & Thompson, J. D. (1965). The simulation of hospital systems. *Operations research*, 13(5), 689-711.

Feng, L. H., Zhang, X. C., & Luo, G. Y. (2008). Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(3), 269-278.

Ford, A., & Ford, F. A. (1999). *Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems*. Island press.

Forrester, J. W. (1987). Lessons from system dynamics modeling. *System Dynamics Review*, 3(2), 136-149.

Forrester, J. W. (2007). System dynamics—the next fifty years. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 23(2-3), 359-370.

Forrester, J. W. (1994). System dynamics, systems thinking, and soft OR. *System dynamics review*, 10(2-3), 245-256.

Forrester, J. W. (1995). The beginning of system dynamics.

Forrester, J. W. (1997). Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, 48(10), 1037-1041.

Forrester, J. W. (1970). Urban dynamics. *IMR; Industrial Management Review (pre-1986)*, 11(3), 67.

Frigoryev I. (2022). *AnyLogic 8 in 3 Days; Sixth edition*.

Gallaher, E. J., Steensma, D. P., Chrisope, T. R., Dingli, D., & McCarthy, J. T. (2011). Individualized Medicine and Biophysical System Dynamics: An Example from Clinical Practice in End Stage Renal Disease.

- Gawande, A. (2010). Checklist manifesto, the (HB). Penguin Books India.
- Gehlbach, H., & Artino, A. R. (2018). The survey checklist (manifesto). *Academic Medicine*, 93(3), 360-366.
- Gellin, B. G., & Qadri, F. (2016). Preparing for the unpredictable: The continuing need for pandemic influenza preparedness. *Vaccine*, 34(45), 5391.
- Goldratt, E. M., Schragenheim, E., & Ptak, C. A. (2017). Necessary but not sufficient: a theory of constraints business novel. Routledge.
- Goldratt, E. M., & COX, J. (1990). *Theory of Constraints*, (Croton-on-Hudson, NY).
- Goldratt, E. M., & Cox, J. (2005). A process of ongoing improvement. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(3), 302.
- Goldstein, J. (2017). A pyrrhic victory? The limits to the successful crackdown on informal-sector plastics recycling in Wenan County, China. *Modern China*, 43(1), 3-35.
- Gordon, C. L., Trubiano, J. A., Holmes, N. E., Chua, K. Y., Feldman, J., Young, G., ... & Kwong, J. C. (2021). Staff to staff transmission as a driver of healthcare worker infections with COVID-19. *Infection, disease & health*, 26(4), 276-283.
- Größler, A. (2020). A managerial operationalization of antifragility and its consequences in supply chains. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(6), 896-905.
- Guidance for the Compilation and Reporting of Data on Municipal Waste according to Commission Implementing Decisions 2019/1004/EC and 2019/1885/EC, and the Joint Questionnaire of Eurostat and OECD. Directorate E: Sectoral and Regional Statistics Unit E-2: Environmental Statistics and Accounts; Sustainable Development. 2021. Available online: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/351811/Guidance+on+municipal+waste+data+collection/> (accessed on 12 October 2021).
- Gupta, M. C., & Boyd, L. H. (2008). Theory of constraints: a theory for operations management. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Hadzistevic, M., & Moraca, S. (2009). Networks and Quality Improvement. *International Journal for quality research*, 3(4), 353-361.

Hajikazemi, S., Ekambaram, A., Andersen, B., & Zidane, Y. J. (2016). The Black Swan—Knowing the unknown in projects. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 226, 184-192.

Hampson, I. (1999). Lean production and the toyota production system or, the case of the forgotten production concepts. *Economic and industrial democracy*, 20(3), 369-391.

Han, S., Love, P., & Peña-Mora, F. (2013). A system dynamics model for assessing the impacts of design errors in construction projects. *Mathematical and Computer Modelling*, 57(9-10), 2044-2053.

Hazhir R., Rogelio O., Nathaniel D. Osgood, *Analytical Methods for Dynamic Modelers*, The MIT Press, Cambridge Massachusetts, ISBN 978-0-262-02949-0, 2015;

Haug, E. G., & Taleb, N. N. (2011). Option traders use (very) sophisticated heuristics, never the Black–Scholes–Merton formula. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 77(2), 97-106.

Heidrich, O., Harvey, J., & Tollin, N. (2009). Stakeholder analysis for industrial waste management systems. *Waste Management*, 29(2), 965-973.

van den Berg, H. (2012). International risk assessment and decision making in dutch small and medium sized enterprises. *Journal of Positive Management*, 3(1), 3-17.

Herzlinger, R. E. (2006). Why innovation in health care is so hard. *Harvard business review*, 84(5), 58.

Hodgson, G. M. (1993). The economy as an organism—not a machine. *Futures*, 25(4), 392-403.

Homer, J. B., & Hirsch, G. B. (2006). System dynamics modeling for public health: background and opportunities. *American journal of public health*, 96(3), 452-458.

Hooke, J. C. (2021). *The Myth of Private Equity: An Inside Look at Wall Street's Transformative Investments*. Columbia University Press.

Hoyt, R. E., & Liebenberg, A. P. (2008, January). The value of enterprise risk management: Evidence from the US insurance industry.

Hovmand, P. S. (2014). Group model building and community-based system dynamics process. In *Community based system dynamics* (pp. 17-30). Springer, New York, NY.

Hubbard, G. (2009). Measuring organizational performance: beyond the triple bottom line. *Business strategy and the environment*, 18(3), 177-191.

Hubbard, D. W. (2020). *The failure of risk management: Why it's broken and how to fix it*. John Wiley & Sons.

Iswajuni, I., Manasikana, A., & Soetedjo, S. (2018). The effect of enterprise risk management (ERM) on firm value in manufacturing companies listed on Indonesian Stock Exchange year 2010-2013. *Asian Journal of Accounting Research*.

Ivanova, K., & Sandler, T. (2006). CBRN incidents: Political regimes, perpetrators, and targets. *Terrorism and Political Violence*, 18(3), 423-448.

Vennix, J. A. (1999). Group model-building: tackling messy problems. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 15(4), 379-401.

Jáč, I., Sedlář, J., Zaytsev, A. A., & Zaytsev, A. V. (2013). Principles of creating a cost-cutting strategy at an enterprise by means of the lean production concept.

Jovičić, M., Mačužić, I., Vukićević, A., & Demichela, M. (2019). Enterprise stress testing with system dynamics: A state of research and challenges. *Proc. Eng. Sci*, 1, 65-72.

Jovičić, M., Mačužić, I., Vukićević, A., & Demichela, M. (2019). Stress testing with system dynamics for enterprises: Proposing a new risk approach for the transition to circular economy and sustainable development. *Recycling and Sustainable Development*, 12(1), 13-23.

Jovičić, M., Bošković, G. B., Jovičić, N., Savković, M., Mačužić, I., Stefanović, M., & Klochkov, Y. (2022). Assessment of the Fragility of the Municipal Waste Sector in Serbia Using System Dynamics Modelling. *Sustainability*, 14(2), 862.

Jovicic, N., & Boskovic, G. (2021). Indicators for Municipal and Packaging Waste for 2018–2020 according to Eurostat Requirements. Report-ENVAP 3, Environmental Accession Project; WP-Further Development of waste Indicators for Reporting on Waste Framework and Packaging and Packaging Waste DSIP Targets.

Kalleberg, A. L. (2009). Precarious work, insecure workers: Employment relations in transition. *American sociological review*, 74(1), 1-22.

Katusiimeh, M. W., Burger, K., & Mol, A. P. (2013). Informal waste collection and its co-existence with the formal waste sector: The case of Kampala, Uganda. *Habitat International*, 38, 1-9.

Khanmohammadi, S., Farahmand, H., & Kashani, H. (2018). A system dynamics approach to the seismic resilience enhancement of hospitals. *International journal of disaster risk reduction*, 31, 220-233.

Kleinmuntz, D. N., & Thomas, J. B. (1987). The value of action and inference in dynamic decision making. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 39(3), 341-364.

Kochan, C. G., Nowicki, D. R., Sauser, B., & Randall, W. S. (2018). Impact of cloud-based information sharing on hospital supply chain performance: A system dynamics framework. *International Journal of Production Economics*, 195, 168-185.

Kogan, I. (2011). When informal is normal... On the role of credentials and contacts for the job entry in Serbia. *Research in Social Stratification and Mobility*, 29(4), 445-458.

Kovacevic, M., Jovicic, M., Djapan, M., & Zivanovic-Macuzic, I. (2016). Lean thinking in healthcare: Review of implementation results. *International Journal for Quality Research*, 10(1), 219.

Kovačević, N., Lendak, D., Popović, M., Plećaš Đuric, A., Pete, M., Petrić, V., ... & Lekin, M. (2022). Clinical Presentations, Predictive Factors, and Outcomes of *Clostridioides difficile* Infection among COVID-19 Hospitalized Patients – A Single Center Experience from the COVID Hospital of the University Clinical Center of Vojvodina, Serbia. *Medicina*, 58(9), 1262.

Krstić, G., & Schneider, F. (2015). Formalizing the shadow economy in Serbia: Policy measures and growth effects (p. 179). Springer Nature.

Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., & Shruti, V. C. (2022). A critical synthesis of current peer-reviewed literature on the environmental and human health impacts of COVID-19 PPE litter: new findings and next steps. *Journal of hazardous materials*, 422, 126945.

Kwok, S., Adam, S., Ho, J. H., Iqbal, Z., Turkington, P., Razvi, S., ... & Syed, A. A. (2020). Obesity: a critical risk factor in the COVID-19 pandemic. *Clinical obesity*, 10(6), e12403.

Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K. (2013). What is a complex system?. *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 33-67.

Lane, D. C. (2007). The power of the bond between cause and effect: Jay Wright Forrester and the field of system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 23(2-3), 95-118.

Lavell, A., & Maskrey, A. (2014). The future of disaster risk management. *Environmental Hazards*, 13(4), 267-280.

Lenarduzzi, V., & Taibi, D. (2016, August). MVP explained: A systematic mapping study on the definitions of minimal viable product. In 2016 42th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA) (pp. 112-119). IEEE.

León, J. P. A. (2008). Systems thinking: The key for the creation of truly desired futures. *International Journal of Reality Therapy*, 28(1), 15.

Liker, J. K. (2004). *Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. McGraw-Hill Education.

Lobão, E. C., & Porto, A. J. V. (1997). A simulation study systematization.(Portuguese) In. In Proceedings of the XVII ENEGEP œ NATIONAL CONGRESS OF INDUSTRIAL ENGINEERING.

Lu, Y., Guan, Y., Zhong, X., Fische, J. N., & Hogan, T. (2021, August). Hospital Beds Planning and Admission Control Policies for COVID-19 Pandemic: A Hybrid Computer Simulation Approach. In 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (pp. 956-961). IEEE.

Luke, D. A., & Stamatakis, K. A. (2012). Systems science methods in public health: dynamics, networks, and agents. *Annual review of public health*, 33, 357.

Luo, T., & Mann, A. (2011). Survival and growth of Silicon Valley high-tech businesses born in 2000. *Monthly Lab. Rev.*, 134, 16.

Ran, L., Chen, X., Wang, Y., Wu, W., Zhang, L., & Tan, X. (2020). Risk factors of healthcare workers with corona virus disease 2019: a retrospective cohort study in a designated hospital of Wuhan in China. *Clinical Infectious Diseases*.

Rowan, N. J., & Laffey, J. G. (2020). Challenges and solutions for addressing critical shortage of supply chain for personal and protective equipment (PPE) arising from Coronavirus disease (COVID19) pandemic-Case study

from the Republic of Ireland. *Science of the Total Environment*, 725, 138532.

Ford, D. N., & Lyneis, J. M. (2020). System dynamics applied to project management: a survey, assessment, and directions for future research. *System Dynamics: Theory and Applications*, 285-314.

Lyubchenko, A., Bartosh, S., Kopytov, E., Shiler, A., & Kildibekov, A. (2017, April). Anylogic-based discrete event simulation model of railway junction. In *Computer Science On-line Conference* (pp. 141-149). Springer, Cham.

Macedo, A., Gonçalves, N., & Febra, C. (2021). COVID-19 fatality rates in hospitalized patients: systematic review and meta-analysis. *Annals of epidemiology*, 57, 14-21.

Mačuzić, I., & Đapan, M. (2016). LEAN koncept u upravljanju proizvodnjom. Dostupno na: https://www.researchgate.net/profile/Marko_Djapan/publication/305136360_LEAN_koncept_u_upravljanju_proizvodnjom/links/578f55f608aecbca4cadce4b/LEAN-koncept-uupravljaju-proizvodnjom.pdf.

Mabin, V., Yee, J., Babington, S., Caldwell, V., & Moore, R. (2018). Using the Theory of Constraints to resolve long-standing resource and service issues in a large public hospital. *Health Systems*, 7(3), 230-249.

Mabin, V. J., & Balderstone, S. J. (2003). The performance of the theory of constraints methodology: analysis and discussion of successful TOC applications. *International Journal of Operations & Production Management*.

Mabin, V. J., & Balderstone, S. J. (2020). *The world of the theory of constraints: a review of the international literature*. CRC Press.

Makarov, V. V., Frolov, Y. B., Parshina, I. S., & Ushakova, M. V. (2019, October). The design concept of digital twin. In 2019 Twelfth International Conference "Management of large-scale system development"(MLSD) (pp. 1-4). IEEE.

Makridakis, S. (1981). If we cannot forecast how can we plan?. *Long Range Planning*, 14(3), 10-20.

Makridakis, S. (1982). Chronology of the last six recessions. *Omega*, 10(1), 43-50.

Makridakis, S., & Hibon, M. (2000). The M3-Competition: results, conclusions and implications. *International journal of forecasting*, 16(4), 451-476.

Makridakis, S., & Taleb, N. (2009). Decision making and planning under low levels of predictability. *International Journal of Forecasting*, 25(4), 716-733.

Makridakis, S., & Taleb, N. (2009). Living in a world of low levels of predictability. *International journal of forecasting*, 25(4), 840-844.

Maliapen, M., & Dangerfield, B. C. (2010). A system dynamics-based simulation study for managing clinical governance and pathways in a hospital. *Journal of the Operational Research Society*, 61(2), 255-264.

Marasova, D., Andrejiova, M., & Grincova, A. (2017). Applying the heuristic to the risk assessment within the automotive industry supply chain. *Open Engineering*, 7(1), 43-49.

Massarutto, A. (2007). Municipal waste management as a local utility: Options for competition in an environmentally-regulated industry. *Utilities Policy*, 15(1), 9-19.

Mauboussin MJ., Callahan D., Majd D. (2017). Corporate longevity-Index turnover and corporate performance. Suisse, C.

Minakova, I., Bukreeva, T. B., & Timofeeva, O. (2018). Improvement of solid waste management: organizational and technological aspects. *Journal of applied engineering science*, 16(1).

Meadows, D. H., Meadows, D. H., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). *The limits to growth: a report to the club of Rome (1972)*. Google Scholar, 91, 2.

Meadows, D., & Randers, J. (2012). *The limits to growth: the 30-year update*. Routledge.

Medina, M. (2007). *The world's scavengers: salvaging for sustainable consumption and production*. Rowman Altamira.

Medina, M. (2008). *The informal recycling sector in developing countries: organizing waste pickers to enhance their impact*.

Morecroft, J. D. (2015). *Strategic modelling and business dynamics: A feedback systems approach*. John Wiley & Sons.

Martinez-Moyano, I. J., & Richardson, G. P. (2013). Best practices in system dynamics modeling. *System Dynamics Review*, 29(2), 102-123.

Murphy, J. F., & Conner, J. (2012). Beware of the black swan: The limitations of risk analysis for predicting the extreme impact of rare process safety incidents. *Process Safety Progress*, 31(4), 330-333.

Narassima, M. S., Anbuudayasankar, S. P., Vasudevan, S. K., & Mohanavelu, T. (2022). Performance improvement in cardiology department of a

hospital by simulation. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 22(1-2), 1-20.

Nnorom, I. C., & Osibanjo, O. (2008). Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. *Resources, conservation and recycling*, 52(6), 843-858.

Olshaker, M., & Osterholm, M. T. (2017). *Deadliest enemy: our war against killer germs*. Hachette UK.

Olson, D. L., & Wu, D. D. (2017). Sustainability and enterprise risk management. In *Enterprise risk management models* (pp. 193-204). Springer, Berlin, Heidelberg.

Paul, S. K., & Chowdhury, P. (2020). Strategies for managing the impacts of disruptions during COVID-19: an example of toilet paper. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 21(3), 283-293.

Peck, A. J., Newbern, E. C., Feikin, D. R., Isakbaeva, E. T., Park, B. J., Fehr, J. T., ... & Lingappa, J. R. (2004). Lack of SARS transmission and US SARS case-patient.

Peck, S. (1998). Group model building: facilitating team learning using system dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, 49(7), 766-767.

Poskurica, M., Stevanović, Đ., Zdravković, V., Čekerevac, I., Ćupurdija, V., Zdravković, N., ... & Petrović, M. (2022). Admission Predictors of Mortality in Hospitalized COVID-19 Patients – A Serbian Cohort Study. *Journal of clinical medicine*, 11(20), 6109.

Prasad, K. D., Murthy, P. K., Gireesh, C. H., Prasad, M., & Sravani, K. (2021). Prioritization of e-waste management strategies towards green computing using AHP-QFD approach. *Proc. Eng*, 3, 33-40.

Quon, T. K., Zeghal, D., & Maingot, M. (2012). Enterprise risk management and firm performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 62, 263-267.

Rahman, S. U. (1998). Theory of constraints: a review of the philosophy and its applications. *International journal of operations & production management*.

Rauch, J. E. (1991). Modelling the informal sector formally. *Journal of development Economics*, 35(1), 33-47.

Rehman, A., Khan, K. A., Hamid, T., Nasir, H., Ahmad, I., & Alam, M. (2020). Effective utilization of municipal solid waste as substitute for natural resources in cement industry. *Civil Engineering Journal*, 6(2), 238-257.

Richardson, G. P. (1999). Reflections for the future of system dynamics. *Journal of the operational research society*, 50(4), 440-449.

Richardson, G. P., & Otto, P. (2008). Applications of system dynamics in marketing. *Journal of Business Research*, 61(11), 1099-1101.

Ries, E. (2009). *Minimum viable product: a guide. Startup lessons learned*, 3, 1.

Robinson, S. (2005). Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next?. *Journal of the Operational Research Society*, 56(6), 619-629.

Robinson, S. (2008). Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. *Journal of the operational research society*, 59(3), 278-290.

Rulebook on Daily Records and Annual Report on Waste with Guidance on Filing in; Official Gazette of Republic of RS: Beograd, Serbia, 2021; p. 79. (In Serbian)

Rother, M., & Shook, J. (2003). *Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda*. Lean enterprise institute.

Saeidi, P., Saeidi, S. P., Sofian, S., Saeidi, S. P., Nilashi, M., & Mardani, A. (2019). The impact of enterprise risk management on competitive advantage by moderating role of information technology. *Computer standards & interfaces*, 63, 67-82.

Sarkis, J. (2020). Supply chain sustainability: learning from the COVID-19 pandemic. *International Journal of Operations & Production Management*.

Schneider, K. N., Masthoff, M., Gosheger, G., Schopow, N., Theil, J. C., Marschall, B., & Zehrfeld, J. (2020). Generation Y in surgery-the competition battle for talent in times of talent shortage. *Der Chirurg; Zeitschrift fur Alle Gebiete der Operativen Medizen*, 91(11), 955-961.

Schragenheim, E., Dettmer, H. W., & Patterson, J. W. (2009). *Supply chain management at warp speed: Integrating the system from end to end*. Auerbach Publications.

Schuklenk, U. (2020). What healthcare professionals owe us: why their duty to treat during a pandemic is contingent on personal protective equipment (PPE). *Journal of medical ethics*, 46(7), 432-435.

Sheffi, Y. (2015). *The power of resilience: How the best companies manage the unexpected*. mit Press.

Shafiei, E., Davidsdottir, B., Leaver, J., Stefansson, H., & Asgeirsson, E. I. (2015). Simulation of alternative fuel markets using integrated system dynamics model of energy system. *Procedia Computer Science*, 51, 513-521.

Sheffi, Y. (2007). *The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage*. Pearson Education India.

Sheffi, Y. (2015). *The power of resilience: How the best companies manage the unexpected*. mit Press.

Shen, C., Taleb, N. N., & Bar-Yam, Y. (2020). Review of Ferguson et al "Impact of non-pharmaceutical interventions. *New England Complex Systems Institute*, 17.

Twu, S. J., Chen, T. J., Chen, C. J., Olsen, S. J., Lee, L. T., Fisk, T., ... & Dowell, S. F. (2003). Control measures for severe acute respiratory syndrome (SARS) in Taiwan. *Emerging infectious diseases*, 9(6), 718.

Snabe, B., & Größler, A. (2006). System dynamics modelling for strategy implementation – case study and issues. *Systems Research and Behavioral Science: The Official Journal of the International Federation for Systems Research*, 23(4), 467-481.

Sigala, I. F., Sirenko, M., Comes, T., & Kovács, G. (2022). Mitigating personal protective equipment (PPE) supply chain disruptions in pandemics—a system dynamics approach. *International Journal of Operations & Production Management*, 42(13), 128-154.

Ahmed, S. (2018). Increase the efficiency and productivity of sewing section through low performing operators improvement by using eight wastes of lean methodology. *Global Journals of Research in Engineering*, 18(J2), 43-60.

De Souza, L. B. (2009). Trends and approaches in lean healthcare. *Leadership in health services*.

Spencer, M. S., & Cox, J. F. (1995). Optimum production technology (OPT) and the theory of constraints (TOC): analysis and genealogy. *The International Journal of Production Research*, 33(6), 1495-1504.

Statistical Office of the Republic of Serbia. Estimated Number of Population in the Republic of Serbia. 2020. Available online: <https://www.stat.gov.rs/en-US/vesti/20210701-procenjen-broj-stanovnika-2020/?s=1801> (accessed on 2 November 2021).

Stauffer, D., Adler, J., & Aharony, A. (1994). Universality at the three-dimensional percolation threshold. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 27(13), L475.

Sterman, J. D. (1989). Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management science*, 35(3), 321-339.

Sterman, J. D. (1992). System dynamics modeling for project management. Unpublished manuscript, Cambridge, MA, 246.

Sterman, J. (2000). *System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*.

Study to Support the Implementation of Reporting Obligations Resulting from the New Waste Legislation Adopted in 2018. Eunomia Research & Consulting. 2018. Available online: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3d72ef00-bcac-11e9-9d01-01aa75ed71a1> (accessed on 12 October 2021).

Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & UCHIKAWA, S. (1977). Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *The international journal of production research*, 15(6), 553-564.

Sukholthaman, P., & Sharp, A. (2016). A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. *Waste Management*, 52, 50-61.

Tadić D., Tadić B., Milanović D., *Statističke metode za upravljačke i inženjerske probleme*, ISBN: 978-86-6335-009-0, 214;

Taleb, N. N. (1997). *Dynamic hedging: managing vanilla and exotic options* (Vol. 64). John Wiley & Sons.

Taleb, N. N. (2007). *The black swan: The impact of the highly improbable* (Vol. 2). Random house.

Taleb, N. N. (2009). Errors, robustness, and the fourth quadrant. *International Journal of Forecasting*, 25(4), 744-759.

Nicholas Taleb, N. A. S. S. I. M. (2015). The black swan: The impact of the highly improbable. *Victoria*, 250, 595-7955.

Taleb, N. N., & Douady, R. (2011). A map and simple heuristic to detect fragility, antifragility, and model error. NYU-Poly working paper, SSRN.

Taleb, M. N. N., Canetti, M. E., Kinda, M. T., Loukoianova, M. E., & Schmieder, M. C. (2012). A new heuristic measure of fragility and tail risks: application to stress testing. International Monetary Fund.

Taleb, N. N., & Goldstein, D. G. (2011). The problem is beyond psychology: The real world is more random than regression analyses. *International Journal of Forecasting*, Forthcoming.

Taleb, N. N., & Martin, G. A. (2012). How to prevent other financial crises. *The SAIS Review of International Affairs*, 32(1), 49-60.

Taleb, N. N. (2012). *Antifragile: Things that gain from disorder* (Vol. 3). Random House.

Taleb, N. N., & Douady, R. (2013). Mathematical definition, mapping, and detection of (anti) fragility. *Quantitative Finance*, 13(11), 1677-1689.

Taleb, N. N., Read, R., Douady, R., Norman, J., & Bar-Yam, Y. (2014). The precautionary principle (with application to the genetic modification of organisms). arXiv preprint arXiv:1410.5787.

Taleb, N. N. (2015). *Silent risk: Lectures on probability*. Available at SSRN.2392310.

Taleb NN., *CONVEXITY RISK AND FRAGILITY*, The Tecnical Incherto, 2, Steam Academic Publishing, ISSN 2018;

Tamosiuniene, R., Demianchuk, M., & Koval, V. (2019). State regulation of bankruptcy relations in the national economy. *Economics. Ecology. Socium*, 3(4), 19-27.

Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International journal of production economics*, 103(2), 451-488.

Taylor, J. B., & Williams, J. C. (2009). A black swan in the money market. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 1(1), 58-83.

Tetlock, P. E., & Gardner, D. (2016). *Superforecasting: The art and science of prediction*. Random House.

Tetlock, P. E. (2017). Expert political judgment. In *Expert Political Judgment*. Princeton University Press.

Trost, A. (2014). *Talent relationship management: Competitive recruiting strategies in times of talent shortage*. Springer Science & Business.

Tsur, Y., & Zemel, A. (1996). Accounting for global warming risks: Resource management under event uncertainty. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 20(6-7), 1289-1305.

Vacante, M., D'Agata, V., Motta, M., Malaguarnera, G., Biondi, A., Basile, F., ... & Salamone, S. (2012). Centenarians and supercentenarians: a black swan. Emerging social, medical and surgical problems. *BMC surgery*, 12(1), 1-8.

Van der Linden, A. (2018). Scenarios for Municipal Waste Recycling Based on the European Reference Model on Municipal Waste – A Contribution to the First Early Warning Report [Internet]. The European Environment Agency: København, Denmark.

Veeramachaneni, K. (2016). Why you're not getting value from your data science. *Harvard Business Review*, 7.

Unit, E. I. (2007). Best practice in risk management: a function comes of age. A report by the Economist Intelligence Unit.

Wang, H., Cai, L., & Zeng, W. (2011). Research on the evolutionary game of environmental pollution in system dynamics model. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 23(1), 39-50.

Watson, K. J., Blackstone, J. H., & Gardiner, S. C. (2007). The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. *Journal of operations Management*, 25(2), 387-402.

Watts, S. (1997). Epidemics and history. In *Epidemics and History*. Yale University Press.

Watts, J. (2004). SARS under control, but lab-safety questions remain. *The Lancet*, 363(9423), 1780.

Waring, J. J., & Bishop, S. (2010). Lean healthcare: rhetoric, ritual and resistance. *Social science & medicine*, 71(7), 1332-1340.

Weiss, H. H. (2013). The SIR model and the foundations of public health. *Materials mathematics*, 0001-17.

Wilensky U., (1997). NetLogo Fire model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Fire>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL

Wilensky U., (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.

Wilensky, U., & Rand, W. (2015). An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo. Mit Press.

Winz, I., Brierley, G., & Trowsdale, S. (2009). The use of system dynamics simulation in water resources management. *Water resources management*, 23(7), 1301-1323.

Wilson, D. C., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Carpintero, A., Velis, K., ... & Simonett, O. (2015). Global waste management outlook. UNEP.

Williams, R., Irati, A., Andreea, B., & Graeme, N. (2020). Emerging Challenges of Waste Management in Europe-Limits of Recycling [Internet]. European Environment Agency (EEA): København, Denmark.

Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (2007). The machine that changed the world: The story of lean production--Toyota's secret weapon in the global car wars that is now revolutionizing world industry. Simon and Schuster.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (1997). Lean thinking – banish waste and create wealth in your corporation. *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), 1148-1148.

World Bank. Serbia's New Growth Agenda; World Bank: Washington, DC, USA, 2019.

Wu, D., & Olson, D. L. (2010). Enterprise risk management: coping with model risk in a large bank. *Journal of the Operational Research Society*, 61(2), 179-190.

Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Tian, X., Liu, C., & Li, H. (2020). Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121366.

Veeramachaneni, K. (2016). Why you're not getting value from your data science. *Harvard Business Review*, 7.

Yamaguchi, K., & Home, M. (2013). Money and macroeconomic dynamics. Awaji Island, Japan: Japan.

Yang, Y., Li, J., & Zhao, Q. (2014). Study on passenger flow simulation in urban subway station based on anylogic. *Journal of Software*, 9(1), 140-146.

Yang, H., Xia, J., Thompson, J. R., & Flower, R. J. (2017). Urban construction and demolition waste and landfill failure in Shenzhen, China. *Waste management*, 63, 393-396.

Yeh, J. Y., & Lin, W. S. (2007). Using simulation technique and genetic algorithm to improve the quality care of a hospital emergency department. *Expert Systems with Applications*, 32(4), 1073-1083.

Zhang, D., Hu, M., & Ji, Q. (2020). Financial markets under the global pandemic of COVID-19. *Finance research letters*, 36, 101528.

Zia, H., Devadas, V., & Shukla, S. (2008). Assessing informal waste recycling in Kanpur City, India. *Management of Environmental Quality: An International Journal*.

Биографија кандидата

Милош Јовичић је рођен 1. 9. 1991. године у Чачку, Република Србија. Завршио је основну школу "Светозар Марковић", у Крагујевцу са одличним успехом. Прву техничку школу, уписао је 2006. године и завршио 2010. године са одличним успехом. Школске 2010./2011. године уписао је Основне академске студије Машинско инжењерство на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Основне академске студије смер Индустријски инжењеринг, завршио је 2013. године са просечном оценом 9,17. Школске 2013./2014. године уписао је Мастер академске студије, смер Индустријско инжењерство на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Мастер академске студије завршио је са просечном оценом 9,73. Мастер рад, под називом LEAN Start-up метода управљања ризиком, одбранио је школске 2015. године са оценом 10.

Докторске академске студије на студијском програму Индустријско инжењерство и инжењерски менаџмент уписао је школске 2015./2016. године. Током студија био је активни члан организације ESTIEM. Од 2011.-2015. године био је: председник ESTIEM локалне групе за Крагујевац, члан Главног одбора и учесник ESTIEM Council Meeting у Истанбулу 2014. године. Учествовао је у организовању више међународних ESTIEM догађаја на којима су били студенти националних и страних универзитета. Поред чланства у ESTIEM организацији, члан је организације IEEE/IEEE Technology and Engineering Management Society као и организације Turnaround Management Association.

Учешће на такмичењима:

- 2011. године *FTN Challenge Novi Sad, Serbia*
- 2012. године *TIMES Semi-finales Ilmenau, Germany*
- 2013. године *TIMES Roland Berger Semi-finales Istanbul, Turkey*
- 2014. године *TIMES Semi-finals ITU Istanbul, Turkey*
- 2015. године *TIMES Semi-finals FTN Novi Sad, Serbia*

Боравак у иностранству:

1. Cranfield University, Велика Британија, двонедељни боравак, април 2014. године;
2. Politecnico di Torino, Италија, Erasmus+ Program, 6 месеци школске 2016./2017. године;
3. Vilnius Gediminas Technical University, Литванија, Erasmus+ Program, 5 месеци школске 2017/2018. године;

Учешће у научно-истраживачким пројектима:

1. Примена биомедицинског инжењеринга у претклиничкој и клиничкој пракси, ИИИ41007, пројекат подржан од Министарства просвете и науке Србије; Учешће на пројекту 2018-2022;
2. NEWSIMR&D, NEWSIMR&D MANAGEMENT OF NEW SECURITY RISKS – RESERACH AND SIMULATION DEVELOPMENT, пројекат је подржан од

Фонда за науку Републике Србије, број пројекта: #7749151. Учешће на пројекту: 2022 -2025.

3. AI4WorkplaceSafety, пројекат је подржан од Фонда за науку Републике Србије, број пројекта: #6524219. Учешће на пројекту: 2021 - 2022.

Учешће у извођењу наставних активности:

Од јануара 2018. Године до маја 2022 године запослен је као истраживач на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Као истраживач сарадник изводио је вежбе на предметима: Машински материјали, Истраживачки рад у машинству, Основи предузетничког менаџмента и економије.

Познавање страних језика:

- Енглески језик –IELDS сертификат С1-ниво;
- Почетни ниво руског језика;
- Почетни ниво италијанског језика;

Научно-истраживачки рад

Као аутор или коаутор кандидат је до сада објавио следеће радове:

1. Jovičić M, Bošković GB, Jovičić N, Savković M, Mačužić I, Stefanović M, Klochkov Y. Assessment of the Fragility of the Municipal Waste Sector in Serbia Using System Dynamics Modelling. Sustainability. 14(2):862, 2022;
2. Petrovic, M., Vukicevic, A. M., Djapan, M., Peulic, A., Jovicic, M., Mijailovic, N., & Jovanovic, K., Experimental Analysis of Handcart Pushing and Pulling Safety in an Industrial Environment by Using IoT Force and EMG Sensors: Relationship with Operators' Psychological Status and Pain Syndromes. Sensors. 22(19): 7467, 2022;
3. Caiazzo, C., Savković, M., Radenković, M., Vukićević, A., Jovičić, M., & Djapan, M., Framework of modular industrial assembly workstations in a collaborative environment, 2022;
4. Vukicevic A.M. Jovicic G.R. Jovicic M.N, Milicevic V.L., Filipovic N.D., Assessment of cortical bone fracture resistance curves by fusing artificial neural networks and linear regression, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 21(2): 169, 2018;
5. M. Kovacevic, M. Jovicic, M. Djapan, I. Zivanovic-Macuzic, Lean Thinking in Health Care: Review of Implementation Results, International Journal for Quality Research 10(1): 219, ISSN 1800-6450, 2016;
6. Milos Jovicic, Ivan Macuzic, Arso Vukicevic, Micaela Demichela, Stress Testing with System Dynamics for Enterprise: Proposing a New Risk Approach for the Transition to Circular Economy and Sustainable Development, Recycling and Sustainable Development, accepted for publication, doi:10.5937/ror1901013J, www.rsd.tfbor.bg.ac.rs/?page_id=27, December 2019;

7. Isailovic V, Djapan M, Savkovic M, Jovicic M, Milovanovic M, Minovic M, Milosevic P, Vukicevic A. Compliance of head-mounted personal protective equipment by using YOLOv5 object detector. In 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET) 2021 Dec 9 (pp. 1-5). IEEE; 2021;
8. Milos Jovicic, Ivan Macuzic, Arso Vukicevic, Micaela Demichela, Enterprise Stress Testing with System Dynamics: A State of Research and Challenges, Quality Festival Conference, Kragujevac Serbia, May 29th- June 1st 2019, http://conferences.cqm.rs/festival/2019/doc/Conference_agenda.pdf;

Запослење

Као истраживач сарадник био је запослен на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у периоду од 2018. до 2022. године. Од маја 2022. године запослен је у Истраживачко-развојном институту за вештачку интелигенцију Србије у Новом Саду. Такође, од новембра 2022. године ради као Пројектни аналитичар у United Nations Development Programme, UNDP Belgrade.

Образац 1

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

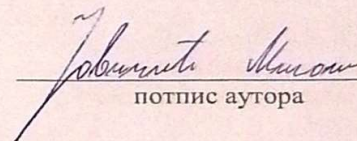
Фрагилност као фактор ризика код високо оптимизованих LEAN пословних система _____

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, 28. 12. 2022. године,


_____ потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Милош Н. Јовичић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

Фрагилност као фактор ризика код високо оптимизованих LEAN
пословних система

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

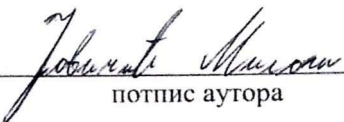
3) Ауторство - без прерада

4) Ауторство - некомерцијално

5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима

6) Ауторство - некомерцијално - без прерада²

У Крагујевцу _____, 28.12.2022. 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>

Образац 3

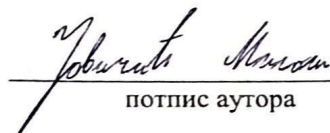
**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:

**Фрагилност као фактор ризика код високо оптимизованих LEAN пословних
система** _____

истоветне.

У Крагујевцу, 28. 12. 2022. године,



потпис аутора